

研究活動 ? . プラズマ研究グループ

雑誌名	年次研究報告
巻	2017
ページ	249-284
発行年	2018-09
URL	http://hdl.handle.net/2241/00153491

X プラズマ研究グループ

教授	中嶋洋輔、坂本瑞樹
准教授	吉川正志、假家 強、南龍太郎
講師	小波蔵純子、平田真史、沼倉友晴
助教	池添竜也
シニアスタッフ	大川和夫
大学院生(物理学専攻)	20名
学群学生(物理学類)	8名

共同研究者

准教授	片沼伊佐夫、江角直道（物理工学域）
研究員	市村 真、今井 剛、東郷 訓、飯島貴朗

研究協力者

技術専門官	杉山昭彦
技術専門職員	和所保規、遠藤洋一、嶋 頼子、千勝雅之
研究支援推進員	岡崎 昇
大学院生(電子・物理工学)	2名
学群学生(応用理工学類)	2名

【1】大学法人化に向けての、当該プラズマグループの研究の方針・基本理念

当プラズマ研究グループでは、平成16年度から実施された大学の法人化に伴う筑波大学の「中期計画」に則り、筑波大学が世界に広く貢献できる優れた研究成果の創出の一端を担うことを使命として、下記の様に研究の新展開を図ることを基本方針・基本理念としている。

法人化後の新制度のもと、グループ教職員学生一丸となり研究に邁進し、当該グループとして、数理工学科学研究科の中期目標・中期計画の推進はもとより、国立大学法人筑波大学第Ⅲ期中期目標・中期計画の「4 世界トップレベルの研究の推進に向けての目標を達成するための措置」として、第Ⅱ期に引き続き明記されていることは、本学のプラズマ研究の歴史を拓いた当該グループとしても、その責務を重く受け止め、応分の貢献を行うことを目指すことは、法人化後の一貫した研究姿勢である。

また、上記「筑波大学 中期計画」等に基づき、平成16年度から開始した双方向型共同研究の枠組みを背景に、第Ⅲ期中期計画においても、核融合科学研究所と、筑波大学、京都大学、大阪大学、九州大学の4大学を中心に、新たに加わった富山大学、更に講座単位の各大学との共同研究を積極的に推進し、普遍性の高い学術成果と、それに基づく核融合実用への基盤研究を進めており、第Ⅲ期中期計画の2年目である平成29年度においても、更に双方向型共同研究の深化と国内外の共同研究の強化に務めている。

学内にあっては、プラズマ研究センターをはじめとする連携協力研究・教育、その他の学内の関連グループとの共同研究、更には国内・国外のプラズマ研究グループとの緊密な連携・研究協力の基に、顕著な成果の創造・推進を図ることを基本理念・基本目標・基本方針に掲げ、教職員学生一丸となり、日夜努力を積み重ねている。

【2】プラズマ研究の研究目的と意義・位置づけ

物理学専攻のプラズマ実験グループが主体となって研究しているプラズマ研究センターでは、「プラズマ物理学、特に電位／電場によるプラズマ閉じ込めの向上、並びにプラズマの高性能化に係る教育・研究」等を行うことが、中期計画・新しい筑波大学規則・規定に則した研究目的の柱である。本研究目的は、核融合実用に必要不可欠で喫緊の課題である「数億度の高性能プラズマと常温壁の両立の理工学研究」を行い、プラズマ物理・核融合研究の進展に本質的且つ普遍的な貢献を行うという、プラズマ核融合分野全体に広く役立つ、重要な位置づけを持つ。

この研究は、国際熱核融合実験炉 ITER の心臓部である炉心プラズマの高閉じ込めHモードや、環状型プラズマのエネルギー閉じ込めの改善で注目を集めているドリフト波などの揺動の制御、内部輸送障壁 (ITB) の形成機構とその効果の究明、また、核融合炉の成否を決めるとも言える境界／ダイバータプラズマの制御など、先端的な極めて重要な研究課題の解決という意義・位置づけを併せ持っている。これらの重要課題に対し、装置端部を持つミラー型実験装置は、電子を選択的に電子サイクロトロン加熱により高温・高速化し、ミラー端部における電子フローの一部を制御し、これによりプラズマ内部の電位／電場を自在に形成・制御が可能、また、ミラー特有の端損失の制御という、「ミラーにしかできないこと、ミラーならば他形式プラズマ装置にも普遍的な物理機構解明を含めてできること」、こうしたミラー装置独自の特色を活かした研究を推進している。

これらの研究を具体的に推進するために、ジャイロトロンやビームプローブといった世界最先端の加熱機器や計測機器の開発研究を進めるとともに、それらを用いた研究により、上記で述べた研究課題に関する物理機構解明に不可欠な、プラズマ半径方向 (径方向) の電位分布制御、電場分布の精密な測定による輸送研究、また、ミラー端部で発生する高熱流束によるダイバータ模擬研究が可能となり、学術普遍性の高い極めて重要な本研究課題の更なる究明を進めている。

当プラズマグループの電位閉じ込めの研究は、インスブルックで開催された国際連合の原子力部門である国際原子力機関 (IAEA) の「第7回プラズマ物理並びに制御核融合研究に関する国際会議」において、当研究グループが世界で初めて電位閉じ込めの有効性を実証した、先駆的な実績を持つテーマであることは、斯界では広く知られており、かつて米国のサイエンス誌の表紙を筑波大学のガンマ6装置が飾ったように、先駆的な電位閉じ込め研究の成果を挙げてきた。また、最近では、電位制御の強力なツールであるミリ波帯のマイクロ波源、ジャイロトロンの開発研究も進展し、当センターのみならず、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) にも大きく貢献し、国際原子力機関 (IAEA) の「第23回～26回核融合エネルギー国際会議」で高く評価され、九州大学やプリンストン大学など、他大学や海外との共同研究へと発展しつつある。また、これらの成果の新展開とも言える境界プラズマの研究では、ITERの定常熱流束密度レベルを達成し、「第24回核融合エネルギー国際会議」等で斯界の注目を浴び、これを応用した共同研究が大きく進展している。

国際熱核融合実験炉ITERをはじめ、トカマク・ヘリカル型プラズマ閉じ込め形式をも含む、核融合実用に必要不可欠な研究課題という意義・位置づけを持った研究課題を、プラズマグループは推進し、発展・展開を見ている。すなわち、輸送障壁形成の物理機構の解明と境界プラズマ物理の解明は、核融合装置の実用的経済的なコンパクト化・高信頼化・核融合プラズマの定常制御のために、必要欠くべからざる研究内容であるという意義を持つばかりでなく、プラズマ特性の学術研究・応用研究という観点からも、大学の研究の在り方として最適な学術研究内容とその意義、研究規模であると位置づけられる。

【3】研究成果の概要

(1) はじめに

物理学域プラズマグループでは、大学の第II期中期目標・中期計画からの方針に沿って双方向型共同研究を充実し、大型タンデムミラー装置 GAMMA 10/PDX を用いた高性能プ

プラズマと低壁熱負荷の両立をめざして「開放端磁場と電位／電場効果を活かしたプラズマ輸送制御と境界プラズマ現象の解明研究」を進展させている。第Ⅲ期の２年度である平成 29 年度より、双方向型共同研究の更なる質的向上と高度化を目指し、原型炉へ向けた研究として、開放端プラズマとなるトラス系のスクレップオフ層やダイバータ・プラズマを模擬するとともに、境界プラズマの様々な現象、物理機構解明とそれを通じた熱負荷の軽減法とプラズマ壁相互作用の研究を実施している。平成 28 年度までに、ITER の定常熱負荷に相当する 10 MW/m^2 を大幅に上回る 30 MW/m^2 の端損失熱流束を達成し、端損失プラズマ流の特性を詳細に調べるとともに、本格的なダイバータ模擬実験に向けた V 字ターゲット板を持つ閉構造ダイバータ模擬モジュール（D モジュール）の実験を開始し、水素ガスや希ガスの入射による非接触プラズマ生成・制御の実験を進展させてきた。GAMMA 10/PDX が、これまでにダイバータ模擬の基礎実験を担ってきた小型線形装置と比べて特長的な点は、高磁場下において高温のイオン束を発生・制御できることにあり、この特長を活かしてダイバータ開発における最大の課題である非接触プラズマの制御に関するイオン温度依存性等のデータ取得が可能となっている。これらの模擬実験の基盤となるプラズマ生成に関して、主として用いられる ICRF 加熱アンテナ系やガス入射方法を工夫することにより、端損失イオン束増大の実験を進めている。また、小型のプラズマ生成装置 APSEDAS を用いてプラズマと材料との相互作用に関する研究を進め、ダイバータプラズマに匹敵する低エネルギー・高フラックスのプラズマを材料に照射して、材料表面改質や材料の水素同位体吸蔵に関する研究を進めている。

プラズマグループのもう一つの特長である大電力ジャイロトロンに関して、14 GHz から 300 GHz の広い周波数範囲における MW レベルの開発を進展させている。これまでに、双方向型共同研究における九大応用物理学研究所とのセンター間連携を推進し、同研究所の球状トカマク装置 QUEST での電流駆動実験に大きく貢献してきた。また、米国プリンストン大学との国際共同研究に関しても、着実に進展させている。GAMMA10/PDX の実験においては、大電力長パルスジャイロトロンを用いた高熱流束生成に加えて、高繰り返しパルス運転から ELM 熱負荷の模擬による PWI に関するデータ取得を目指している。さらに、イオン流束等の増大の研究と並行して、京都大学、九州大学との連携を進めている。

平成 29 年度では、これまで精力的に進めてきたダイバータ模擬実験とジャイロトロン開発研究という大きな 2 つの柱を元に、全国の複数のセンターが連携するネットワーク型の双方向型共同研究もさらに発展させ、各大学の研究者の多様な視点、豊富な経験と双方向型共同研究の特徴を活かした研究を進めつつ、核融合炉に向けた必須かつ緊急の課題解決の為の研究を進展させることを本研究の目的とした。

（２）ダイバータ模擬実験

図 1 は、GAMMA 10/PDX 全体図、西エンド部の真空容器と内部に設置された昇降式のダイバータ模擬実験モジュール（D モジュール）の概略図を示している。図 2 の写真で示すように、SUS 製の容器の前面から端損失プラズマ流が導入される D モジュール内部には、V 字型の 0.2 mm 厚のタングステン製ターゲット板及び、前面の流入するプラズマを冷却し、非接触化を起こす為のガス導入系が組み込まれている。また、V 字のターゲット板は、電気ヒータにより最大 300℃まで温度を上昇させることができる。ターゲット板には、電子温度、密度計測のための多チャンネル静電プローブや多チャンネルカロリメーターが取り付けられている。また、図

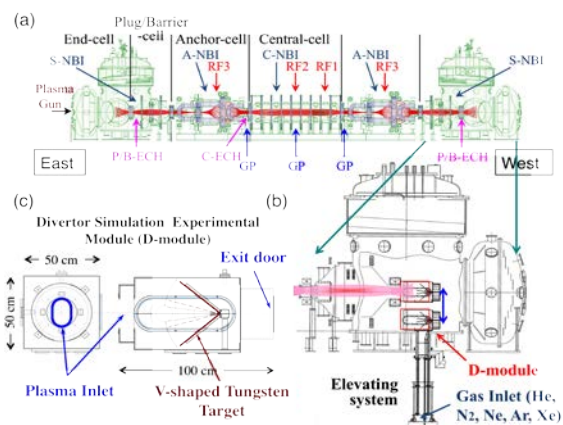


図 1 (a) GAMMA 10/PDX 全体図，(b) 西側エンド部に設置されたダイバータ模擬実験モジュール（D モジュール）の模式図。昇降機構により、従来の配位でのミラー実験が可能である。(c) D モジュールの概略図。

中に示したように、水素ガスや希ガス導入等による放射冷却や不純物輸送などの周辺プラズマを模擬したプラズマ研究や PWI 研究が、高速イオンゲージ (ASDEX Gauge) や各種分光器、高速カメラ等により制御された形で可能となっている。

平成 26 年度から 28 年度にかけて、放射冷却用の不純物ガスとして様々な希ガスや新たに窒素ガスを用い、それぞれのプラズマ冷却効果や非接触プラズマ形成を目差したイオン束、熱流束の低減効果について検証した。今年度は、非接触プラズマに対するプラズマ追加熱系の影響評価を行った。図 3 は、東プラグ ECH を用いた実験の概略図を示す。実験では、Ar, Kr, Xe ガスにより非接触プラズマ状態を形成した後、短パルスの東プラグ ECH による上流部からプラズマ流、もしくは高温の電子流を流入させ、非接触プラズマの状態変化をカロリメータ、ラングミュアプローブ、高速カメラ、分光器等を用いて計測した。

図 4 は上流プラズマの線密度 (N_{LC}) と D-module 内 V 字ターゲットコーナー部に設置したプローブで測定したイオン飽和電流 (I_{i-sat}) の時間変化を示す。図から分かるように、ECH 印加前 ($t < 275$ ms) では、非接触プラズマ状態が得られており、 I_{i-sat} は、Xe, Kr, Ar, の順に強く抑制されており、これまでの非接触プラズマに対する各種ガスの効果を再現する結果が得られている。一方、ECH 入射時 (175 ~ 300 ms) は、ECH 入射開始と共に急激なイオン束の上昇が観測され、カロリメータの変化も ECH 入射を伴うショットと ECH 抜きのショットでの大幅な相違が認められている。この結果から、プラグ ECH による非接触から接触への遷移を示唆する結果が得られた。また、V 字コーナー部前面を観測している分光器による測定結果から、Xe ガスの場合、ECH 時に Xe の 1 価イオンからの発光の急激な増加や高速カメラによるコーナー部領域における発光イメージの強度増加が認められ、コーナー部近傍における再結合反応から電離反応への遷移を示唆する結果が得られた。以上のように、様々な非接触プラズマに対する上流プラズマの変化に対する影響について詳細な結果が得られ始めており、将来のダイバータ運転への有効な知見が得られるものと期待される。

非接触プラズマ生成に対する水素リサイクリング効果の研究では、主に D-module の背面に設置した排気扉の開閉による D-module 内中性ガスの流出のプラズマ非接触化への影響について調べた。今回の実験では、プラズマ持続時間を 400 ms とし、D-module 内への水素ガス供給は、プラズマ点火 ($t = 50$ ms) とほぼ同時に開始してプラズマ終了まで行った。その結果、排気扉が全閉の場合でも全開の場合でも、ガス供給量の増加とともに電子温度が約 2eV 程度まで減少し、電子密度は一旦増加した後に減少するロールオーバーが観測された。ただ

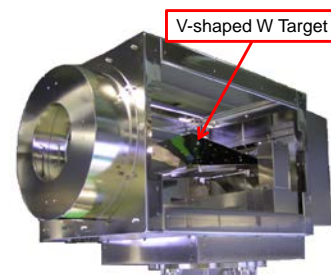


図 2 D モジュールの写真。

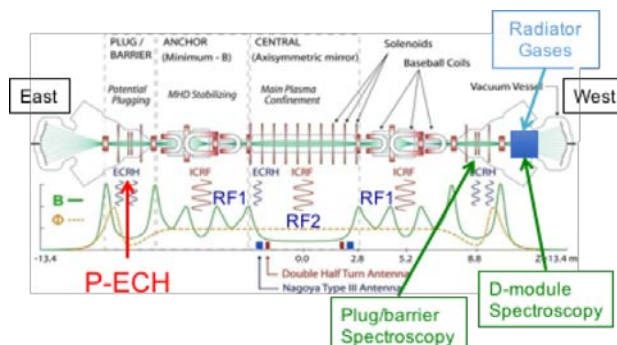


図 3 東プラグ ECH を用いた非接触プラズマへの影響評価実験の概略図

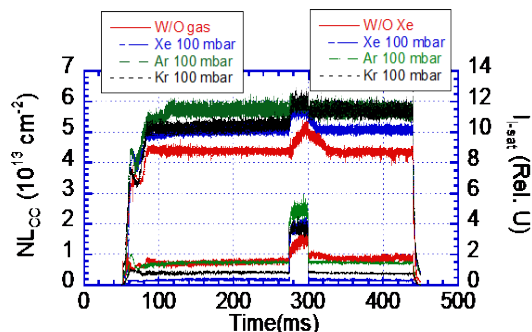


図 4 東プラグ ECH 入射を用いた非接触プラズマへの影響評価実験時の上流プラズマ線密度とコーナー部イオン飽和電流の時間変化

し、電子温度が約 2eV まで減少するのに必要なプレナム圧は、排気扉全閉の場合は 800 mbar であるのに対し、排気扉全開の場合は 1200 mbar であった。この違いは、排気扉を開けることで D-module 内の中性粒子が外部へ排出され、新たな水素ガスが D-module 内に供給されたことによる。考えられるメカニズムとしては、イオン温度の低下、水素原子温度の低下、水素分子の回転、振動励起状態の変化（励起準位の減少）等が複合的に分子活性化再結合に影響を与えたものと考えられる。

（３）マルチバستمソン散乱計測システム

タンデムミラー GAMMA 10/PDX では、主閉じ込め領域であるセントラル部の電子温度・密度の径方向分布計測のため、YAG-トムソン散乱計測システムを導入してきた。これまでに空間 7 点、10 Hz 間隔での時間変化計測を 1 プラズマショットで調べることを可能としてきた。また、ダイバータ模擬部のトムソン散乱計測システムの構築を進めてきた。図 5 にシステムの概略図を示す。当該年度は、セントラル部の径方向分布の詳細計測のため、散乱光集光システムを改良し、受光用光ファイバー設置部の光学台を可動式のものに変更することによって、5 cm 間隔でしか分布計測ができなかったところ、2.5 cm 間隔にて空間分布計測を可能とした。また、プラズマ径方向上側からの散乱信号強度を増加させるために、追加の集光ミラーを設置した。さらに、実験途中でトムソン光学素子等の交換を行った場合の電子密度校正法として、多チャンネルマイクロ波干渉計を用いた電子密度その場校正を行った。

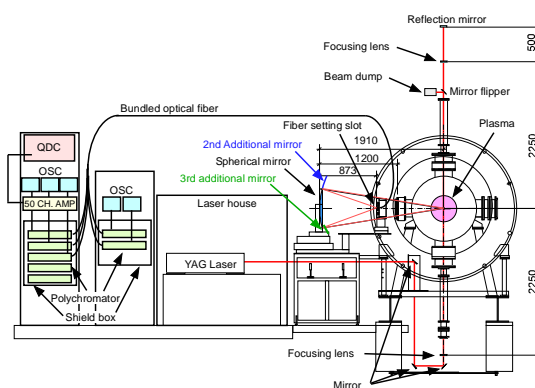


図 5 トムソン散乱計測システムの概略図

また、プラズマ径方向上側からの散乱信号強度を増加させるために、追加の集光ミラーを設置した。さらに、実験途中でトムソン光学素子等の交換を行った場合の電子密度校正法として、多チャンネルマイクロ波干渉計を用いた電子密度その場校正を行った。

（４）大出力長パルスジャイロトロンの開発

筑波大学の大きな特徴である大電力ジャイロトロンに関しては、これまでの NIFS、九大等との共同研究及び QST との連携研究をより強化し、14-300 GHz と周波数範囲を大きく拡張し開発を進めている。平成 29 年度では、昨年度に引き続き 28/35 GHz の 2 周波数ジャイロトロンの開発において順調な進展があった。窓出力 0.45 MW で 2 秒動作時、及び出力停止後の出力窓のサファイア・ディスク温度の時間変化を、整合器 (MOU) に取付けたフッ化バリウム製ビューイングポートを通し赤外線カメラで測定した (図 6)。

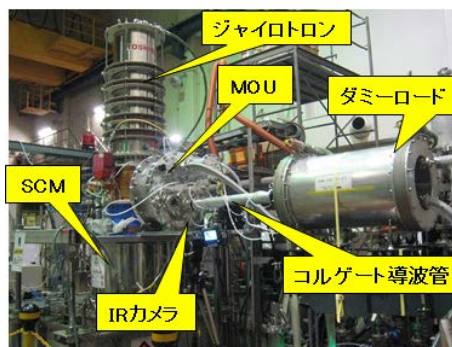


図 6 28/35 GHz ジャイロトロン評価試験

図 7 に、2 枚のサファイア板間に流す冷却材であるフロリナートの各流量に対し、窓温度の時間変化の測定値を示す。冷却材の流量が多いほど、出力停止後の温度低下が速いことが分かった。冷却時間帯の温度変化の測定値と計算値の比較を行うことにより求めたサファイア板から冷却材への熱伝達率を評価すると、出力 0.4 MW に対し、熱伝達率 $h = 0.15 \text{ W/cm}^2\text{K}$ とした時の窓温度変化の計算結果は、ほぼ 80℃で飽和しており（初期温度 20℃）、冷却材の流量を 30L/min 以上取れば、28 GHz-0.4 MW-CW 動作が

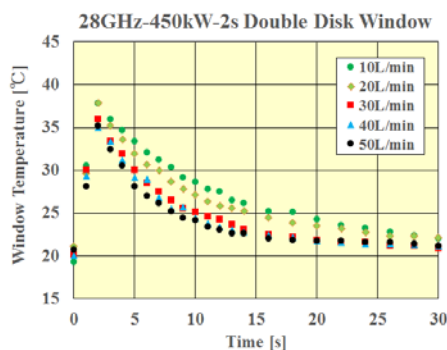


図 7 サファイア窓温度の時間変化

可能と考えられる。今年度は、0.46MW-2.8 秒までの動作を確認しており、来年度に CW ダミーの整備等を行い、準 CW 動作確認の予定である。また現在、電子ビームの分散改善のため、電子銃の改造を進めており、来年度、28 GHz で 1.5 MW 以上、35 GHz で 1 MW 以上の出力を目指す予定である。

筑波大学と九州大学間のセンター間連携研究に基づき、筑波大学で開発した 28 GHz-1 MW ジャイロトロンを九州大学の QUEST 装置に適用しプラズマ実験が行われている。今年度は、将来の CW 運転をも視野に、QUEST 本体窓をダブル・ディスク型窓に変更するため、その製作組立と周波数帯域調整を行った。ダブル・ディスク窓は 2 枚の誘電体板の間に、RF 吸収の小さい冷却材を流すことで高い冷却効率を得る構造の窓である。誘電体板間距離により周波数帯域が変わるため、前記 2 周波数ジャイロトロンを電力源として、28GHz で整合が得られるように誘電体板間距離を調整した。ダブル・ディスク窓は、組立/調整後、QUEST 本体に取付けられ、プラズマ実験が行われている。QUEST プラズマ実験では、九州大学と NIFS で改良された偏波器の導入やプラズマ調整等により、世界最大となる 86 kA の無誘導プラズマ電流の駆動が達成された。このことは、NIFS 双方向型共同研究におけるセンター間連携研究としての大きな成果と考えられる。以上のほかにも、将来の QUEST や GAMMA 10/PDX 中央部加熱への適用を見込み 14 GHz ジャイロトロンの設計検討を進めている。

(5) プラズマ材料表面相互作用

核融合炉のプラズマ対向壁材料の候補となっているタングステンの水素同位体吸蔵特性の研究を、小型プラズマ生成装置 APSEDAS を用いて進めている。中性子照射を模擬した高エネルギー重イオン照射によって生成されるタングステン中の欠陥の水素捕獲特性を調べるために、再結晶タングステンに対して 2.4 MeV の銅イオンを 0.4 dpa 照射後に重水素プラズマを照射してから SIMS 計測を行い、銅イオンと重水素イオンの深さ方向分布を測定した。銅原子の深さ方向分布は SRIM コードにより計算された分布と同様であること、重水素原子の深さ方向分布は銅イオンの存在する領域にほぼ限られていることが明らかとなった。一方、銅イオンを照射していない再結晶タングステン試料に対して、同様の重水素プラズマ照射を行った後の SIMS 計測では重水素原子は低濃度ではあるが銅イオン照射した試料の場合よりも奥深くまで存在していることが示された。これらの結果は、照射損傷による欠陥が水素を捕獲するとともに水素の拡散を阻害している可能性を示唆している。また、水素同位体吸蔵量低減を目的として、タングステン基材表面にクロム層とタングステン層を蒸着した試料を開発して、その水素吸蔵特性の初期結果を得た。さらに、プラズマ照射中の表面改質のその場観測を行うために、APSEDAS において分光エリプソメトリー測定システムを構築して初期計測結果を得た。

(6) 成果発表等

平成 29 年度には、平成 23 年度から筑波大学およびつくば地区で毎年開催している全国のダイバータに代表される境界領域プラズマ、壁材料等に係る多く研究者が参加した研究会として、8 月にプラズマ研究センターシンポジウムを核融合エネルギーフォーラムダイバータ研究開発ワーキンググループのフォローアップ会合との合同で行い、参加者も約 90 名と昨年度を上回る盛況であった。また、本学総合研究棟 B において、11 月にセンターが主催で、ドイツ ユーリッヒ総合研究機構および米国オークリッジ国立研究所共催、国際エネルギー機関の後援により、「第 6 回核融合研究のためのプラズマ-材料相互作用実験装置に関する国際ワークショップを開催し、国内外から約 60 名の研究者（うち海外からは 23 名）の参加のもと、センターより 13 件の報告を行った。11 月開催されたプラズマ・核融合学会第 34 回年会では 37 件の講演を行い、そのうちの博士課程大学院生の発表した 1 件が若手学会発表賞を受賞した。また、同会議ではセンターにおいて現在検討している将来計画を議論するインフォーマルミーティングを主催し、広く核融合コミュニティーに向けて発信した。上記国際会議を含む国際発表は 43 件（内招待講演は 2 件）、国内の会議は全 72 件に達し、学術雑誌では 17 編の発表を行った。

【4】 GAMMA 10 における超音速分子性ビームによる粒子供給

(1) はじめに

磁場閉じ込め型の核融合プラズマ実験装置において、中性粒子輸送や水素リサイクリング・周辺プラズマ挙動観測は、タンデムミラープラズマやダイバータ領域でのプラズマ挙動解明ばかりでなく、プラズマ・壁相互作用からコアプラズマの輸送に至るまでの幅広い情報・指針を与える重要な研究対象である。従来からタンデムミラー型プラズマ閉じ込め装置 GAMMA 10 では、高密度プラズマ生成・維持が課題であり、超音速分子性ガスビーム入射(SMBI)法を用いたガス供給や、ICRF 周波数帯加熱等の工夫により研究が進められてきた。特に近年、GAMMA 10 装置は端損失粒子を用いたダイバータ模擬装置への改造および実験が進められており、本研究の推進によりパラメータ領域が拡大できれば、主閉じ込め領域のプラズマ性能向上だけでなく、ダイバータ模擬実験への貢献も期待される。

本研究においては、近年ラバールノズルを用いたSMBI実験を開始し、指向性の高い粒子供給が可能であることが分かった。本研究の目的は、新たに導入したラバールノズルの効果を、実験とシミュレーションの両面において検証することである。昨年度はセントラル部GP付近に設置されているラバールノズルを用いたSMBIによる高密度プラズマ生成実験を行った。今年度は、新たに東アンカー部内側変換領域にSMBIを設置し、その応答を調べた。また、GAMMA 10端部へ損失するイオン束(端損失粒子束)の解析を本格的に開始し、SMBIによる密度上昇と粒子束挙動との関係を調べた。

(2) 実験方法

GAMMA10 には種々のガスパフ(GP)が設置されており、用途に応じて使い分けることができる。セントラル部中央付近に設置されている SMBI に加え、今回東アンカー部内側変換領域に SMBI を設置した(図 1 参照)。SMBI 用ラバールノズルの設計に関しては核融合科学研究所の協力を得た。セントラル部中央付近の SMBI と異なり、ポートの制約から高速カメラが設置できず、単視線の H α 線強度検出器が設置されている。端損失粒子束は両エンド部に設置されている端損失イオンエネルギー分析器(ELIEA)を用いた。これは端損失イオンのエネルギー分析が可能な装置で有り、粒子束だけでなく閉じ込め電位の評価も可能である。

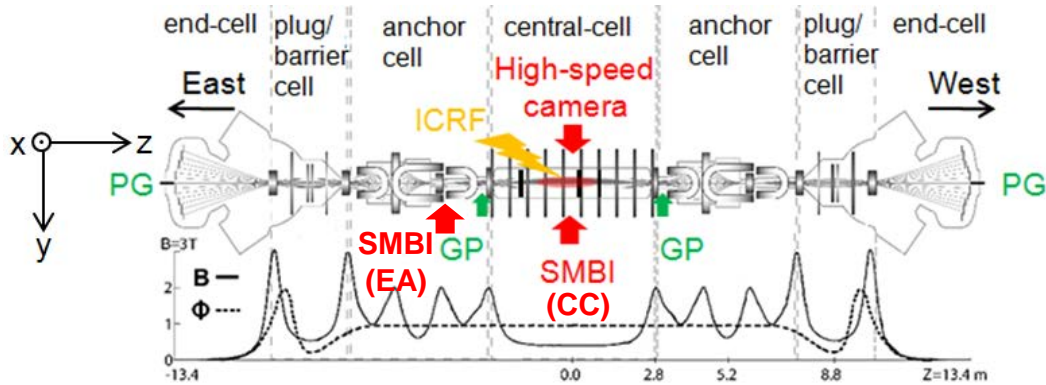


図 1 GAMMA 10 に設置されているガスパフおよび SMBI 装置。SMBI はセントラル部中央部(CC)および東アンカー部内側変換領域(EA)に設置されている。

(3) 実験結果

SMBI は ICRF 加熱プラズマ中($t = 150$ ms)に入射し、その動作時間を 0.5 ms とした。SMBI のプレナム圧を 0.3 MPa から 2.0 MPa まで変化させて密度の応答を観測した。図 2 にプレナム圧力が 1.0 MPa の場合の放電波形を示す。SMBI 入射直前のターゲットの線平均密度はセントラル部で $1.4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ (プラズマ半径を 18 cm として算出) であり、 1.0 MPa のプレナム圧力の場合にはピーク値で 1.4 倍の増加が見られた。東アンカー部(EA)、セントラル部(CC)、西アンカー部(WA)のそれぞれの密度の時間発展を比較すると、最初に EA で

の増加が見られ、ピーク密度の時刻はSMBI 設置位置 ($z=-370$ cm)での H_α 線発光強度のそれにほぼ等しい。EA での密度増加に伴い CC での密度増加が見られた。特徴的なこととして、1 ms 程度遅れて WA での密度増加も観測された。一方でセントラル部での中性粒子密度の増加がないにもかかわらずセントラル部の蓄積エネルギー (DM_{cc}) が低下しており、これはアンカー部での中性粒子密度の増加に伴う蓄積エネルギーの過渡的な低下が MHD 不安定性を増加させた事に起因すると思われる。これら動的な密度・温度変化については今後輸送を考慮した解析が必要である。

東アンカー部SMBIにより期待される効果として、セントラル部における荷電交換損失の緩和が挙げられる。SMBIのプレナム圧力を0.3 MPaから2.0 MPaまで変化させて、SMBI直後のセントラル部電子線密度の増分、及び蓄積エネルギーの最低値を、セントラル部SMBI実験と比較したところ、セントラル部SMBIの場合には、0.3 MPaの場合でも蓄積エネルギーは 0.2×10^{-4} Wbと低く、プレナム圧力に対する依存性が弱いことが分かった。一方で、東アンカー部SMBIの場合にはプレナム圧力が低いほど蓄積エネルギーの低下が抑えられた。例えばプレナム圧力が0.8MPaの場合ではセントラル部電子密度の増分はほとんど同じであるが蓄積エネルギーは3倍近く大きい。ただしプレナム圧力が1.5 MPa以上の場合には蓄積エネルギーの低下はセントラル部SMBIとほぼ変わらず、ある圧力範囲内では東アンカー部SMBIの効果があることがわかった。

また、端損失粒子束はSMBIに応答した変化を観測した。一方で、この時にはELIEAの偏向電界強度 V_{def} をスイープさせて粒子束のエネルギー分布を計測したため、SMBIのような速い時定数を持つ現象の場合、ピーク値を計測できていない問題がある。そのため今後は放電中の偏向電界を一定とし、放電毎にスキャンした計測が必要である。なお端損失粒子束の $1/e$ 減衰時間はおおよそ1.5ms程度であった。このような過渡的な粒子束変化はダイバータ模擬実験におけるELM模擬にも用いることが可能であると考えられる。一方でELM時の熱・粒子束の総量だけでなくイオン・電子のエネルギー分布をどのように模擬するかは重要な課題であり、この点からも端損失粒子束の時空間・速度分布計測が重要となる。

(4) まとめ

今回初めてセントラル部以外でのSMBIを東アンカー部内側変換領域にて試験することができ、プレナム圧力が1MPa以下の場合には蓄積エネルギーの低下を緩和しつつ、セントラル部SMBIと同等の電子線密度の増加が得られた。また端損失粒子束の解析を開始し、SMBI供給量に対する端損失粒子束の増加を得た。今後はSMBIのELM模擬への適用を検討するため、端損失粒子束の詳細な時空間・速度分布計測を行う予定である。

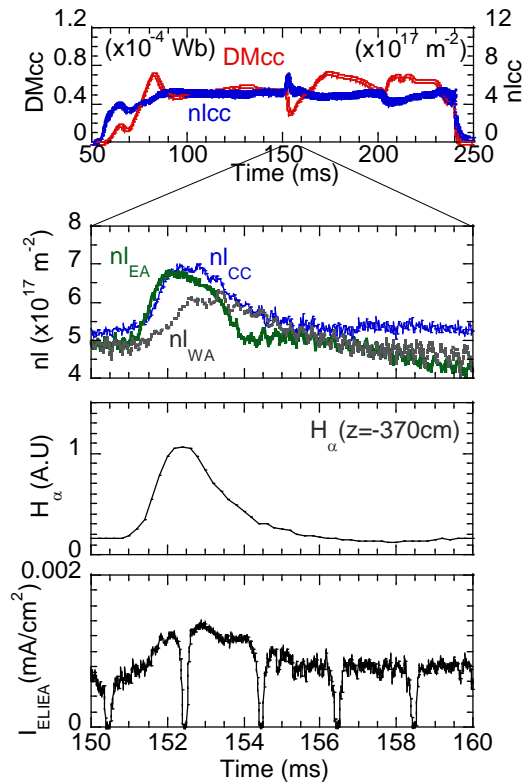


図2 東アンカー部 SMBI 導入実験(1.0MPa)におけるセントラル部電子線密度(nl_{cc})および蓄積エネルギー(DM_{cc})時間発展。セントラル部(CC)、東アンカー部(EA)、西アンカー部(WA)の電子線密度、 H_α 線発光強度および端損失粒子束。

【5】タンデムミラー端部を用いたダイバータ模擬研究

(1) はじめに

核燃焼プラズマの定常維持の為に、高熱流束に耐えるダイバータの開発が急務の課題となっている。開放端磁場配位は、ダイバータと共通する磁力線の構造をしており、タンデムミラープラズマにおいて、軸方向閉じ込め電位の無いプラズマ周辺部はトーラスプラズマの SOL 領域に、ミラー端部はダイバータ板前面の開いた磁場領域に酷似している。本研究の目的は、タンデムミラープラズマ閉じ込め装置 GAMMA 10/PDX のダイバータプラズマの模擬装置としての可能性を探るために、実験的及び数値計算に基づいた検討を行うことである。これによって、開放端磁場配位を活かし、ダイバータ開発における課題解決に向けた貢献を行う。

(2) 実験装置

図 1 に GAMMA 10/PDX 全体図及び、西エンド部真空容器と平成 24 年度から稼働を開始したダイバータ模擬実験モジュール (Dモジュール) の配置を示す。平成 23 年度までに設置した計測器は、端部ミラーコイルの中心から中心軸外側に向かって 30 cm の位置 ($Z_{\text{EXIT}} = 30$) にあるカロリメータと方向性プローブの複合計測器、複数のターゲット及び計測器を備えて、 $Z_{\text{EXIT}} = 70$ cm に設置されている回転式ターゲットアセンブリ、エンドタンクに設置されている端損失イオンエネルギー分析器 (ELIEA) などある。また、ターゲット材とプラズマとの相互作用光は、高速カメラを用いて計測されている。

Dモジュールの概略図を図 1 (b) に示す。本モジュールは、SUS 製の断面 50×48 cm、長さ 70 cm の直方体の容器で、前方にある $\phi 20$ cm の円形ポートから、端損失プラズマ流が導入される。容器内部には、V 字形の 2 枚のタングステン製ターゲット (30 cm \times 35 cm) が設置されており、V 字形開口部の角度が 15 度から 80 度まで可変となっている。ターゲットの表面及び V 字コーナー部には、静電プローブとカロリメータのアレイが設置されており、端損失プラズマ流の粒子束、熱流束が測定される。また、後部にはガス排出口が設置され、扉の開き角度を変えることにより、容器内部の中性粒子圧力を制御できるようになっている。

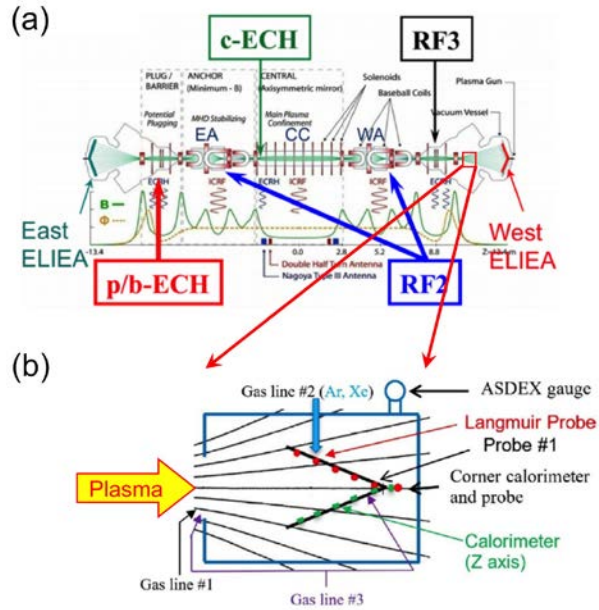


図 1 GAMMA 10/PDX 装置の概略図と西エンド部に設置した D-module

(3) 実験結果

今年度は、非接触プラズマに対するプラズマ追加熱系の影響評価を行った。実験では、Ar, Kr, Xe ガスにより非接触プラズマ状態を形成した後、短パルスの東プラグ ECH による上流部からプラズマ流、もしくは高温の電子流を流入させ、非接触プラズマの状態変化をカロリメータ、ラングミュアプローブ、高速カメラ、分光器等を用いて計測した。

図 2 は、上流プラズマの線密度 (N_{Lc}) と D-module 内 V 字ターゲットコーナー部に設置したプローブで測定したイオン飽和電流 (I_{i-sat}) の時間変化を示す。図から分かるように、ECH 印加前 ($t < 275$ ms) では、非接触プラズマ状態が得られており、 I_{i-sat} は、Xe, Kr, Ar, の順に強く抑制されており、これまでの非接触プラズマに対する各種ガスの効果を再現する結果が得られている。一方、ECH 入射時 (175~300 ms) は、ECH 入射開始と共に急激なイオ

ン束の上昇が観測され、カロリメータの変化も ECH 入射を伴うショットと ECH 抜きのショットでの大幅な相違が認められている。この結果から、プラグ ECH による非接触から接触への遷移を示唆する結果が得られた。

図 3 は、Xe ガス入射による非接触プラズマ時において高速カメラでとらえた ECH 入射前後の D-module 内部のプラズマ発光画像を示す。ECH 入射前に暗かった V 字コーナー付近が ECH 入射と共に局所的に強く発光していることが分かる。また、V 字コーナー部前面を観測している分光器による測定結果から、Xe ガスの場合、ECH 時に Xe の 1 価イオンからの発光の急激な増加や高速カメラによるコーナー部領域における発光イメージの強度増加が認められ、コーナー部近傍における再結合反応から電離反応への遷移を示唆する結果が得られた。

以上のように、様々な非接触プラズマに対する上流プラズマの変化に対する影響について詳細な結果が得られ始めており、将来のダイバータ運転への有効な知見が得られるものと期待される。

(4) まとめ

ダイバータ模擬実験装置 D モジュールを用いた本格的ダイバータ模擬実験において、種々の放射冷却用ガスの非接触プラズマ化への効果が検証され、今回不純物ガス導入による非接触プラズマ形成時の ECH によるプラズマ加熱効果が及ぼす影響について詳細に検証された。今後は更に熱流・粒子束密度の強化に向けてプラズマ生成・加熱の最適化を推し進めると共に、ダイバータ模擬実験、非接触プラズマの特性とその定常維持に関する機構解明へ向けて研究を進めてゆく。

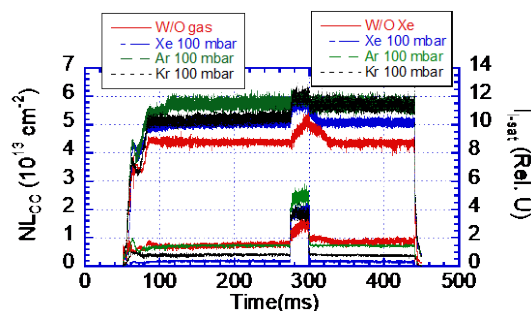


図 2 東プラグ ECH 入射を用いた非接触プラズマへの影響評価実験時の上流プラズマ線密度とコーナー部イオン飽和電流の時間変化

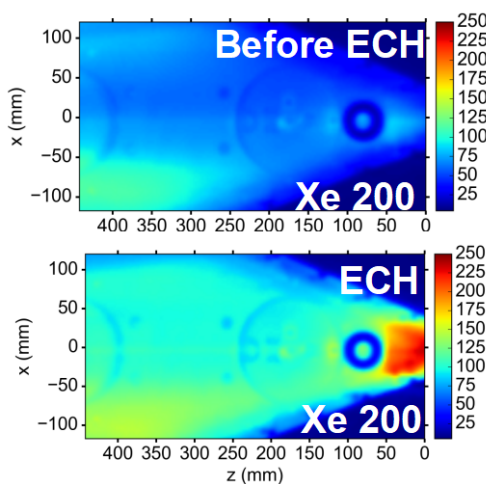


図 3 高速カメラでとらえた D-module 内部のプラズマ発光画像

【6】 GAMMA 10 E-div 領域における多流体コードによる数値シミュレーション解析

(1) はじめに

直線型装置は、定常状態での実験が可能であることや、磁場構造が単純な為、観測ポート設置の利便性が非常に高い事などの環状装置には無い有利な特徴があることから、直線型装置を使用した周辺プラズマ研究が、広く世界中で行われている。これらの直線型装置は、トカマク装置に匹敵する粒子束で研究可能である PSI-II の様に、其々の特徴を生かした研究を行っている。そこで、数値計算シミュレーションによって、プラズマにどの物理過程が強く影響を及ぼしているのかを評価する事が非常に重要となる。筑波大学に設置されているタンデムミラー型装置 GAMMA 10/PDX の西エンド部においても、ダイバータ模擬実験が行われている。

本研究の目的は、他の直線型装置と比較してイオン温度が非常に高いプラズマで実験可能である GAMMA 10/PDX を用いたダイバータ模擬実験に対して、新たに構築した数値計

算コードを用いて数値シミュレーションによる解析を行う事によって、高イオン温度プラズマ下におけるプラズマ挙動を解明する事である。また、高イオン温度プラズマに不純物粒子や中性粒子の外部ガスパフを行った際の背景プラズマ挙動並びに、ターゲット板への熱・粒子負荷について数値計算コードを用いて評価する事である。これにより、GAMMA 10/PDX で行われているダイバータ模擬実験で現れる物理機構に対する理解や、トカマク、及びヘリカル型装置における周辺プラズマ挙動の研究に大きく貢献できる。

(2) メッシュおよび物理モデル

本研究で開発した流体コード LINDA (Linear Divertor Analysis with fluid code) は、トカマク等で広く用いられている B2 コードと同様の物理モデルで構築された方程式を使用している。図 1 に GAMMA 10 プラグバリア部及びエンド部の真空容器プラズマ形状の概略図と同部に設定した数値シミュレーション計算空間のメッシュ構造を示す。

GAMMA 10/PDX は、セントラルセル、アンカーセル、プラグ・バリアセルとエンドセルの 4 つのセルによって、構成されている。プラズマは、主としてセントラルセルにおいて生成され、ロスコーンに落ち込んだ荷電粒子がセントラルセルから、各セルを経由してエンドセルに流出する。

GAMMA 10/PDX では、この端損失プラズマを利用してダイバータ模擬実験を行っている。その為、エンド部における磁力線構造を基に計算空間内のメッシュを作成する必要がある。また、エンド部に存在するプラズマは、セントラルセルから流出したプラズマであるので、エンド部に流入するプラズマパラメータは常に一定であり、軸対称性を持つと仮定した。ターゲット板は、計算空間終端に、タングステン製の円形ターゲット板を設置していると仮定した。一方、プラズマ内不純物中性粒子のモデルとしてエンド部に一様な分布を与え、プラグバリアに向かって指数関数的に減少する分布とした。

以上の様に、GAMMA 10/PDX の磁力線構造と各境界条件を、新たに開発した数値計算コードに適用させた上で、テスト計算を行った。その結果、非線形性が強い系で計算される全ての変数について、より良い収束性が確認されたことから、開発した本計算コードは、GAMMA 10/PDX の環境下においても、正しく稼働している事を確認している。

(3) 計算結果

今回のシミュレーション解析では、不純物ガスとして、Ar、Kr と Xe という比較的重い希ガスを導入した際の放射冷却の挙動を調べた。図 2 は、Ar、Kr、Xe ガスを $5 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ の密度を与えた場合の (a) : 電子温度 T_e 、(b) : イオン温度 T_i 、(c) : 電子密度 n_e の各々の 2 次元プロファイルを示している。電子温度の冷却効果については、図 3 (a) に示すように Xe が最も強く、Ar の効果が弱く Kr がその中間程度であることを示している。イオン温度についても、同様の結果を示しているが、Ar と Kr の違いは電子温度に比べて少ないことが判った。図 2 (c) に示す電子密度は、上流端部と途中の端部ミラースロート領域 ($Z=10 \text{ m}$) の 2 個所で強いピークが観測されているが、後者は磁束管内がミラースロート部で収縮さ

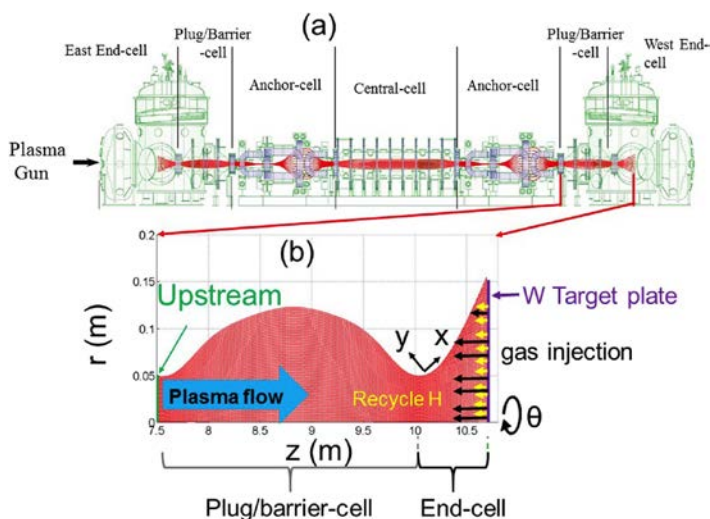


図 1 GAMMA 10/PDX エンド部に設定した数値シミュレーション計算空間 (a) GAMMA 10/PDX 全体の真空容器とプラズマ形状, (b) 西エンド部に設定したシミュレーション空間のメッシュ形状、各種境界条件

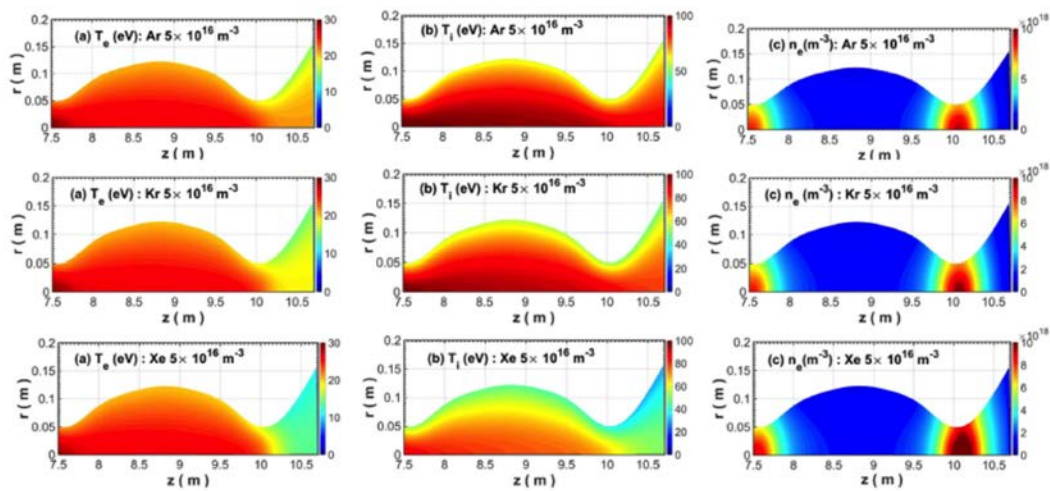


図2 Ar : $5.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ Kr : $5.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ 及び Xe : $5.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ を導入した場合のプラズマ温度・密度の空間構造のシミュレーション解析結果

れる効果による粒子バランスから密度が上昇したものと考えられる。いずれの場合も Xe ガスが最も高い密度を示している。

図3は、上記とシミュレーション解析の結果得られたイオンと電子のパワー損失量と放射損失の体積分量を各ガス種（ガス導入密度： $5.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ ）で比較したものである。図で示すように Ar, Kr, Xe の順で、イオン・電子の損失量は増加している。また、本シミュレーション解析から、イオンの損失機構について荷電交換損失が重要な役割を果たしていることも明らかになっている。一方、図3(b)に示すように、放射損失が、Xe が他のガスに比べて、3倍以上大きい値を示していることが判る。このことから、Xe ガスのプラズマ冷却効果が高いことをシミュレーションでも再現することが出来た。

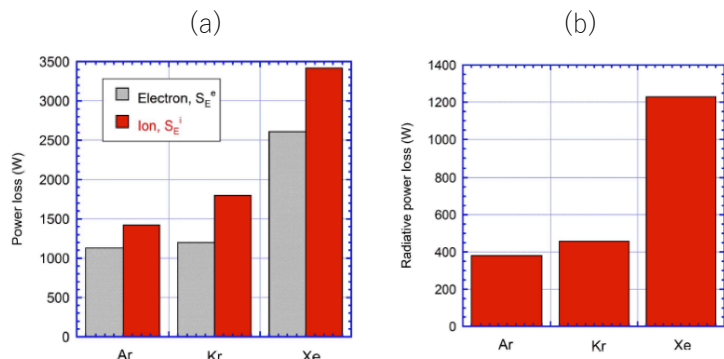


図3 イオンと電子のパワー損失量(a)と放射パワー(b)の各ガス種における比較

(4) まとめ

本研究で開発している多流体数値計算コード LINDA を用いて、GAMMA 10 エンド部におけるダイバータ模擬実験におけるプラズマ流の挙動を調べている。今回 Ar ガス Kr ガス及び Xe ガス入射による放射冷却等、非接触プラズマ形成へ向けた特性の比較が可能となり、Xe ガスの冷却効果が他に比べて高いことがシミュレーションでも確認できた。今後は、分子に起因する再結合過程 (MAR) など、より詳細な原子分子過程等や、系内における中性粒子の輸送についても厳密に考慮した計算を進めてゆく。

【7】 GAMMA 10/PDX におけるトムソン散乱計測システムによる電子温度・密度計測

タンデムミラー GAMMA 10/PDX では、主閉じ込め領域であるセントラル部の電子温度・密度の径方向分布計測のため、YAG-トムソン散乱計測システムを導入してきた。これまでに

空間 7 点、10 Hz 間隔での電子温度・密度計測を 1 プラズマショットで調べることを可能とした。また、ダイバータ模擬部のトムソン散乱計測システムの構築を進めた。本年度は、セントラル部の径方向分布の詳細計測のため、散乱光集光システムを改良し、受光用光ファイバー設置部の光学台を可動式のものに変更することによって、5 cm 間隔でしか分布計測ができなかったところ、2.5 cm 間隔にて空間分布計測を可能とした。また、プラズマ径方向上側からの散乱信号強度を増加させるために、追加の集光ミラーを設置した。さらに、実験途中でトムソン光学素子等の交換を行った場合の電子密度較正法として、多チャンネルマイクロ波干渉計を用いた電子密度その場校正を行った。

GAMMA 10/PDX のセントラル部のトムソン散乱計測システムは、プラズマからの 90° 散乱光を集光する。これまでは直径 60 cm の凹面集光ミラー、直径 20 cm の下部測定用追加集光ミラーに加えて、新たに 12×30 cm の上部測定用追加集光ミラーを設置した。これにより、プラズマ上部からの散乱信号強度を増強できることになる。予定では、 $x = 10, 15, 20$ cm の位置で 20, 50, 70 % の増加となる。現在のところ、ラマン・ガス散乱実験で確認したところ、5, 10, 12 % の増加となっており、さらなる追加ミラーの設置位置の最適化が必要である。プラズマ径方向分布の詳細計測のため、集光光学系の光ファイバーアレイを設置している光学台を上下可動可能なラボジャッキ (Thorlabo, L490) に交換した。これにより、プラズマショット毎ではあるが、径方向測定位置を 5 cm 間隔、空間 7 点であったところを、2.5 cm 間隔、空間 15 点で測定可能とした。

トムソン散乱計測システムの電子密度その場校正には、GAMMA 10/PDX セントラル部中心部 $Z = 0$ cm に設置した多チャンネルマイクロ波干渉計を用いた。多チャンネルマイクロ波干渉計は、70 GHz のミリ波を用いたヘテロダイン型干渉計であり、電子線密度を Y 方向空間 6 点計測する。そして、プラズマ電子線密度分布から Abel 変換を用いて電子密度分布を導出可能である。この電子線密度と、トムソン散乱計測で求めた電子密度分布の径方向積分と比較して、トムソン散乱計測による密度の校正値を求めることができる。以上の改良を進めて、GAMMA 10/PDX セントラル部のプラズマ電子温度、電子密度分布計測を行った。図 1 に、プラズマ 3 ショットで計測したプラズマ電子温度(a)、密度分布(b)を示す。これらの改良によって、空間 15 点の電子温度・密度の空間分布計測が可能となった。

エンド部のトムソン散乱計測システムは、セントラル部に設置してある YAG レーザーの光を分岐して、エンド部までレーザー光を伝送した。エンド部のトムソン散乱光学系の散乱点までの距離は、約 21 m である。YAG レーザーは、高さ 1.8 m から水平にエンド部のポートに入射し、真空容器の中に凹面集光ミラーを設置して散乱光を光ファイバーへと集光する。光ファイバーによって真空容器から取り出された散乱光は、低温測定用に開発した

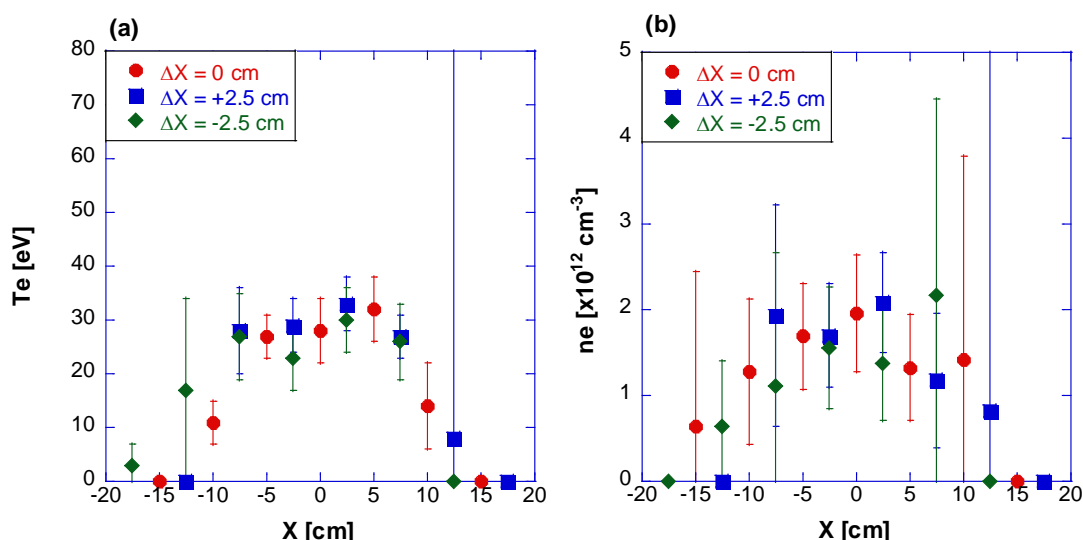


図 1. 電子温度(a)、電子密度分布(b)

ポリクロメーターに取り付け、ポリクロメーターからの出力信号はオシロスコープで収集する。エンド部トムソン散乱計測システムは、後方 160° 散乱で測定し、立体角は、約 70 mstr である。本年度は、集光光学系の周りに迷光防止用の遮光板を取り付け、レーザーのビームダンプ位置を集光ミラーの視野からはずす等の迷光対策を行ったが、ラマンガス散乱実験でも迷光成分が大きくさらなる対策が必要であった。

【8】アンプ付きマルチパス・トムソン散乱システムの開発

プラズマの電子温度・密度を高時間分解能で計測することは、ペレット入射実験、ELM模擬実験など、電子温度、電子密度が高速で変化するプラズマにおいてその物理機構を解明するために重要である。トムソン散乱計測では、電子温度を直接測定できるため非常に有効な手法であるが、時間分解能は使用するレーザー発振周期で制限されており、kHzオーダーでの測定が上限となっている。本研究では、MHzオーダーの時間分解能をもつ高時間分解トムソン散乱計測システムを開発することを目的とした。この高時間分解能を達成するため、プローブレザーをプラズマ中に何度も往復させてパス毎の散乱信号を測定するマルチパス・トムソン散乱計測システムを構築することとした。しかしながら、レーザー装置外にマルチパスの機構を設置したものでは、パス数の増加とともに散乱信号強度が減衰していき、6パス程度以上では、半分以下になってしまう。そこで、本研究では、レーザー強度が減衰したところでレーザーアンプを用いてプローブレザーのパワーを増強し、散乱信号を安定して測定できるようなマルチパス・システムを新たに構築することとする。増幅方法には、再生レーザー増幅方式を用いることとした。

本年度は、レーザーアンプを導入したマルチパス・システムの光学系を構築し、ビームプロファイラーを用いつつ、レーザーアンプを設置した光路の調整を行った。マルチパス・システムは、像転送光学系と偏光制御素子を用いてレーザーをプラズマ通過後に折り返すミラーと偏光素子によって折り返されたレーザーを再度折り返すミラーへと導き、これらの2枚のミラー間でレーザーを閉じ込める。偏光素子には、高電圧を高速で掛けることで偏光を90° 変えることができるポッケルスセルと偏光によってビームを分岐するキューブ型ビームスプリッターを使用した。この閉じ込められたレーザーは、何度かプラズマを通過して往復している間、トムソン散乱光を放射するので、散乱光信号は、その分1回のパスで放射するよりも大きくなり、また、パス毎に解析すると、高時間分解計測が可能となる。レーザーアンプを用いたマルチパス・システムでは、レーザーを閉じ込めるミラーの前に、新たな偏光素子を挟んで、レーザーパワーが減衰したときに、レーザーアンプへと導くようなパスを構築する。これにより、6パス以降にレーザーアンプへとプローブレザーを通すようにできた。この時、レーザーアンプに導く前に、レーザーのビーム径を調整するため、凸レンズと凹レンズを組み合わせたビーム調整機構を通し、ビーム径をφ9 mm以下に調整した。

図2にレーザーアンプへの入射レーザーパワーとアンプ通過後のレーザーパワー、及び増幅率について示す。これにより、アンプへの入射レーザーパワーが5 W程度のとき、レーザーアンプで増幅すると初期レーザーパワー約18 W程度にまで戻すことが可能であることが確認できた。従って、マルチパス・システムにおいては6パス以降にレーザーアンプを用いてレーザー増幅を行うことで初期のレーザー強度を確保できることを確認した。

次に、レーザーアンプシステムを用いたマルチパス・システムをレーリガス散乱実験に適用して、マルチパス信号の取得を目指して、レーザーパスの調整を行った。図3にレーザーアンプを導入したマルチパス・システムを用いてレーリガス散乱実験を行ったマルチパス信号測定結果を示す。レーザーアンプにレーザーを導く前のマルチパスによって、レーザー強度が減衰し、その結果弱くなったレーリ散乱信号強度が、レーザーアンプを通した後に、再度強い散乱信号となりその後マルチパス信号が観測できている。よって、本レーザーアンプを用いたマルチパス・トムソン散乱システムの構築が可能であることが確認できた。今後、レーザーパスの調整を進め、レーザーパワーを強くして、安定的にマルチパス信号が取得できるようにしていく必要がある。

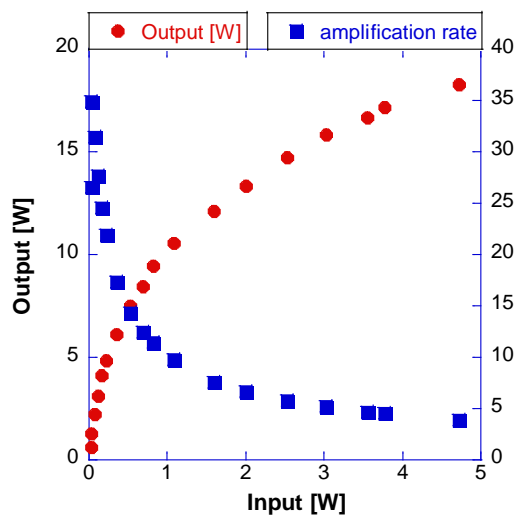


図 2：レーザーアンプへの入射パワーと射出パワー、及び増幅率

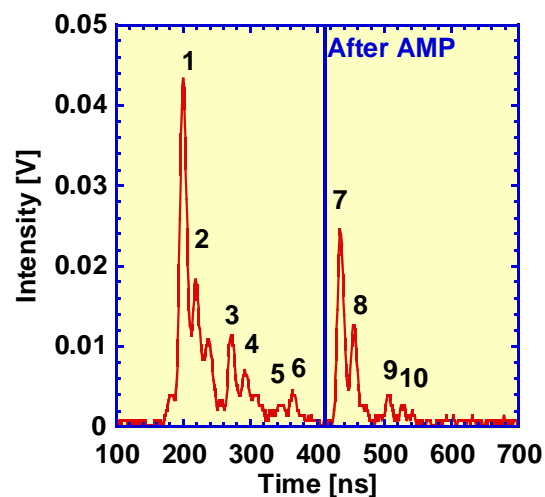


図 3. レーザーガス散乱実験におけるマルチパス信号

【 9 】 GAMMA 10/PDX におけるドップラー反射計の開発と密度揺動の回転計測

(1) ECH 重畳時の密度揺動回転分布計測

本研究では GAMMA 10/PDX セントラル部において、ドップラー反射計を用いた密度揺動の周方向回転計測を行った。イオン・サイクロトロン周波数帯 (ICRF) の高周波で生成・加熱されたプラズマに、バリア部単独、あるいはバリア部・プラグ部両者の電子サイクロトロン加熱 (ECH) を重畳した場合について密度揺動の回転の様子を調べた。

時刻 $t=180\text{--}200\text{ms}$ にバリア ECH 100kW、または、バリア ECH 100kW とプラグ ECH 150kW を重畳する放電を実施した。ドップラー反射計の入射波の設定入射角度は $+2^\circ$ である。得られたドップラー反射計信号のスペクトルより、プラズマ周辺部 (入射周波数 13.7 GHz) のドップラー周波数シフト (密度揺動回転速度に比例) を求めた。ICRF 時間帯ではプラズマが立ち上がりからほぼ定常になった後は低周波数側へのシフトが維持されており、これは電子反磁性方向への回転に対応する。バリア ECH 重畳時は同じく電子反磁性方向への回転を示すが、直前の ICRF 時間帯に比べ速度が若干増加した。一方、バリア・プラグ ECH では ECH 印加後から徐々に電子反磁性方向の速度が小さくなり、更にイオン反磁性方向へと速度が反転した。

また、入射周波数を放電毎にスキャンし、プラズマ半径位置 r に対する回転速度 V_{perp} のプラズマ周辺部付近での空間分布を調べた。一方、重イオンビームプローブ (HIBP) により計測した電位分布は、ICRF 時間帯、バリア ECH 単独重畳時共に中心付近で頂点をもつ下に凸の形状をしていた。 $V_{E \times B}$ は電子反磁性方向となり、ドップラー反射計で得た V_{perp} と方向が一致した。観測する揺動速度は $V_{\text{perp}} = V_{E \times B} + V_{\text{phase}}$ で表され、ここで V_{phase} は揺動 (乱流) の位相速度である。 $r < 13\text{ cm}$ においては、 V_{perp} と $V_{E \times B}$ が近い値を示すデータもあるが、両者の差が有意であるかは検討を要する。 $r > 15\text{ cm}$ からリミター (内径 $r=18\text{ cm}$) 付近は圧力勾配が小さく $V_{\text{perp}} \approx V_{E \times B}$ と仮定すると、リミター近くでは -10V/cm 程度の電場生成の可能性が示された。この周辺部については、最近導入された高速駆動プローブによる電位計測との比較を行う予定である。バリア・プラグ ECH 重畳時の電位は今回取得できなかったが、以前の同様な実験では上に凸の電位分布が計測されている。その場合 $V_{E \times B}$ はイオン反磁性方向の速度となるが、 V_{perp} もイオン反磁性方向の回転を示しており $V_{E \times B}$ の寄与が示唆された。

(2) 周波数コム・ドップラー反射計の開発

揺動や乱流等の発生・抑制機構の解明には種々の情報の多点同時計測が不可欠である。本研究では、径方向多点同時計測が可能なドップラー反射計の開発を行っている。システムには、多周波数のプローブ信号を同時入射可能なコム・ジェネレータを用いている。製作中のドップラー反射計では、入射マイクロ波は 11-18GHz の X モードとなっており、GAMMA 10/PDX の典型的な電子密度分布の例ではプラズマ半径 a (18 cm) に対し $r/a=0.4-1$ 程度の観測位置に対応する。前年度は主に送信回路系を構築し、今年度は受信回路の製作を進めた。コム・ジェネレータの発振周波数間隔は 200MHz である。これらの信号のうち 11.8, 12.8, 13.8, ..., 17.8GHz まで 1GHz 間隔 (一部は 0.4GHz 間隔) の 8 周波数の使用を当面は予定している。各周波数信号は 10.8GHz の局部発振器 (LO) 信号により 1, 2, 3, ..., 7GHz の中間周波数 (IF) 信号に変換される。BPF はこれらの信号を抽出するため、中心周波数まわりで急峻であり、且つ広帯域にわたり良好な減衰特性を有する必要がある。今年度は受信部の製作がまだ一部残っているため引き続き製作を進めており、来年度には本システムをプラズマ実験に適用する予定である。

【10】高周波を用いた初期プラズマ生成と加熱、及び加熱プラズマの巨視的・微視的挙動の解析

イオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) の高周波を用い、プラズマ中の電位形成やプラズマ閉じ込め物理、また、開放端磁場配位を利用したダイバータ模擬実験等の境界プラズマ研究における標的プラズマ生成、イオン加熱の実験を進めている。さらに、高性能プラズマを制御する上で不可欠なプラズマの巨視的・微視的挙動についての研究を並行して進めている。平成 29 年度は、アンカー部アンテナについて、セントラル部電位上昇、及び端損失プラズマ制御に関する考察を進めた。また、セントラル部周辺浮遊電位上昇のメカニズム解明のため、アンカー部周辺浮遊電位計測を行った。バリア部アンテナについては、アンテナ形状の違いに対するプラズマ生成・加熱効果の違いを実験と 3 次元波動解析コードにより検討した。更に、励起 ICRF 波動や温度非等方性により自発励起されるアルベンイオンサイクロトロン (AIC) 波動、低周波揺動の特性を調べるため、マイクロ波反射計を利用した波動計測システムの高度化を進め、揺動の空間構造を計測した。また、AIC 波動間の差周波揺動による高エネルギーイオンの軸方向輸送に関する検討を進めた。一方、直線型装置における高密度プラズマのイオン加熱に関する知見を得るため、新規加熱手法開発を目指した取り組みを開始した。

(1) アンカー部アンテナを用いた端損失プラズマ制御

東、西アンカー部のセントラル側アンテナ (EAI-DAT, WAI-DAT) に 7.7 MHz の高周波をそれぞれ印加すると、東西両端部の端損失イオン束の上昇、高エネルギー側へのエネルギー分布のシフト、高周波を印加した側の端損失イオン温度の上昇が端損失イオンエネルギー分析器 (ELIEA) により測定されている。この時、装置東側に設置されている端損失エネルギー成分分析器 (ELECA) を用いて、端損失イオンのピッチ角分布を測定したところ、低エネルギーイオンのピッチ角 0° 付近の電流の上昇、セントラル部電位の上昇も合わせて測定された。数値計算との比較から、端損失イオン束の上昇は電位上昇に伴うミラープラズマの損失領域拡張によることが明らかになった。また、高いエネルギーイオン電流のピッチ角分布は、高周波印加側のロスコーン内で上昇するが、反対側では変化しないことから、高周波によるイオンのピ

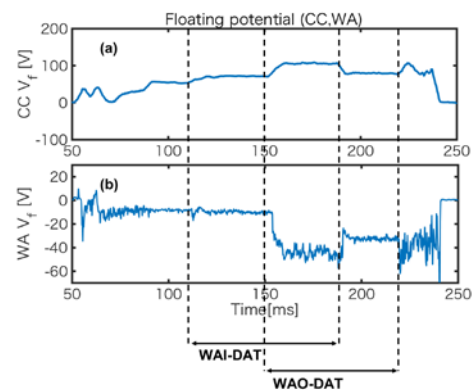


図 1 アンカー部追加加熱時の (a) セントラル部周辺 (b) アンカー部リミター浮遊電位

タッチ角散乱に起因することが明らかになった。即ち、アンカー部アンテナで励起された 7.7 MHz の高周波波動はセントラル側に伝搬し、セントラル部スロート付近のイオンサイクロトロン共鳴層において吸収される。この時、ドップラー効果を含めた共鳴領域は、(A) セントラル部中心からアンテナ側(強磁場側)に向かうイオンの場合、共鳴層からアンテナ側に、(B) アンテナ側からセントラル部中心(弱磁場側)に向かうイオンの場合、共鳴層から中心側に広がって存在する。(B) の場合はアンテナから伝搬した波動は共鳴層で吸収され、イオンと共鳴できない。従って東、西アンカー部アンテナによる端損失イオン温度の差異は、アンカー部アンテナで励起された高周波波動とセントラル部スロート付近のイオンとの共鳴の有無に起因する。以上により、アンカー部アンテナに 7.7 MHz の高周波を印加した場合のイオンの軸方向輸送機構が明らかになった。

(2) アンカー部アンテナによるセントラル部周辺浮遊電位上昇

アンカー部アンテナにより追加熱を行うと、セントラル部中心付近周辺部の浮遊電位が上昇することが観測されている。アンテナに印加する高周波が共鳴条件を持たない周波数でも浮遊電位の上昇が確認されたことから、浮遊電位上昇にイオンサイクロトロン共鳴現象は本質的ではなく、プラズマ中に励起された波動、もしくはアンテナ近傍の高周波電場と電子との相互作用が本質的であると考えられる。そこでアンカー部リミターに中心に各所で周辺浮遊電位計測を行ったところ、アンカー部追加熱により浮遊電位の減少が一部で確認された(図 1)。従って、セントラル部周辺浮遊電位の上昇は、アンカー部における電子の径方向損失が関与していると考えられる。更に非軸対称部であるアンカー磁場変換部においても浮遊電位を計測し、電子の径方向損失の解明を進める。

(3) バリア部アンテナにおける波動励起効率の計算

ダイバータ模擬実験を行う西エンド部に隣接しているバリア部を直接加熱することにより、端損失プラズマ制御が期待される。平成 29 年度は、新たにアンテナに隣接するガス導入部からのガスを遮蔽する板を設置し、磁場に垂直な電流を流す Double Half Turn (DHT) アンテナと、磁場に平行な電流を流す Nagoya Type-III アンテナの 2 種類の加熱条件が異なるアンテナを使用した。アンテナにバリア部中心付近の共鳴層を持つ 7.7 MHz の高周波を印加したところ、プラズマ生成に対しては DHT アンテナが、イオン加熱に対しては Type-III アンテナが効果的であることがわかった。実験結果との比較を行うため 3 次元波動解析コードを用いた波動伝播解析を行ったところ、共鳴領域でイオンが吸収する電力は、Type-III アンテナの方が大きくなった。これは磁場に平行な電流を流すことによりイオン加熱に有効な遅波が強く励起されたためであり、実験結果と矛盾しない結果である。また、端損失粒子束の増大に必要な高密度プラズマに対する波動励起に対する計算も進めた。

(4) 反射計を用いたイオンサイクロトロン周波数帯波動の計測

ICRF 加熱の最適化や制御に活用するため、高温プラズマ内部領域における ICRF 波動の分布をマイクロ波反射計により計測している。現在、3 台のマイクロ波発振器および反射計としての計測システムがあり、そのうちの 1 台の発振器は高速周波数掃引が可能である。この速い周波数応答性を利用し、GAMMA 10 の放電時間 200 ms の間に、多段のステップ状に周波数を変化させて、ICRF 波動に伴う密度揺動の細かい径方向分布を取得した。アンカー部においては、二つのアンテナ(WAI-DAT, WAO-DAT)から同一周波数の波動を印加した際の干渉効果をマイクロ波反射計で計測した(図 2)。共鳴による波動減衰効果を除くために共鳴層を持たない 6.0 MHz を用いた所、アンテナ間の位相差に対して正弦状の変化が観測された。一方、セントラル部、アンカー部に共鳴層がある 6.3 MHz, 9.9 MHz, 10.3 MHz の周波数を印加する実験において、アンカー部

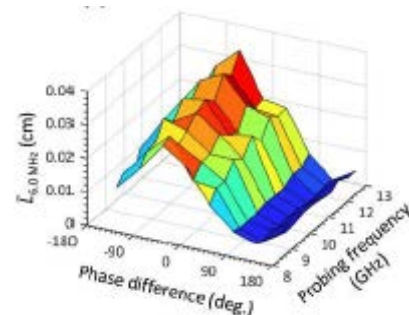


図 2 外部励起 ICRF 波動の干渉の様子

で ICRF 波動の径方向多点計測を行ったところ、9.9, 10.3 MHz の波動は径方向に複数のピークを持つことが明らかになった。セントラル部との比較から、アンカー部中央面に対して両側にある楕円形状の非軸対称磁場部が高次構造に寄与している可能性がある。

セントラル部ではこれまでに整備してきたマイクロ波ホーンアンテナアレイに加えて、 $z = 82 \text{ cm}$ の断面に、方位角方向モード数を同定するためのアンテナペアを設置した。これにより、過去に磁気プローブペアで調べられていたアルベンイオンサイクロトロン波動の方位角モード数が $m = -1$ であることがプラズマ内部領域において示された。この方位角方向アンテナペアを用いて、GAMMA 10 セントラル部で不安定になるドリフト揺動とフルート型揺動の方位角モード数、径方向強度分布、さらに軸方向アンテナアレイを用いた軸方向波数の計測を行った。4-7 kHz の低周波揺動は $m = -1$ 、 ~ 10 , $\sim 15 \text{ kHz}$ は $m = +2$ 、 $\sim 15 \text{ kHz}$, $\sim 23 \text{ kHz}$ は $m = +3$ であることが同定された。また同一位相速度をもつ $m = +1$ の揺動も観測された。これらのモードは磁力線方向に波数を持ち伝搬していること、 $m = -1$ のモードは磁力線方向に波数を持たないフルート型であることが軸方向アンテナアレイから示された。径方向強度分布に関しては、ドリフト揺動、フルート様揺動共に内側で低く、外側で高くなる分布であった。以上のように、プラズマ内部領域でのモード特定に反射計が使えることが示された。

(5) 高エネルギーイオンの AIC 差周波揺動による軸方向輸送の研究

セントラル部の反射計で評価した AIC 波動間の非線形結合から、AIC 波動間の差周波揺動がプラズマ中心領域で顕著に励起され、その差周波の周期で高エネルギーイオンが軸方向に輸送されていることが装置端部での粒子計測から明らかになっている。この波動粒子相互作用を詳細に調べるため、MCP を用いた新しいイオン検出器を整備している。従来の半導体検出器では見えていなかった異なる波動間の差周波揺動成分の観測、径方向内側と外側での差異、セントラル部の反磁性量に対する揺動強度依存性を得た。特に AIC 差周波と高エネルギーイオンとの波動粒子相互作用は径方向内側領域で顕著であること、AIC の差周波数に対して相互作用するイオンエネルギー帯が異なることが明らかになった。今後、更に議論を進める。

(6) 高密度プラズマのイオン加熱に向けた取り組み

高密度直線プラズマ実験装置を用いて、デモ炉設計に必要なダイバータ物理および PWI に関する要素研究が世界中で行われている。特にイオン温度の向上が重要かつ共通の課題であるが、イオンのビーチ加熱に用いられるアルベン遅波は高密度化に伴い遮蔽されることが知られており、高密度プラズマにおけるイオン加熱手法の確立は重要である。そこで、複数の高出力 ICRF 加熱装置を有する GAMMA 10/PDX 装置を用い、高密度領域における遅波励起および加熱効率に関する知見を得ること、高密度領域に適した新規加熱手法を開発すること等を目指した取り組みを開始した。平成 29 年度は、高密度生成が可能な ECR プラズマに対するイオン加熱、速波を利用した新しいイオン加熱手法を目指した実験を試行した。

【11】ガンマ 10 セントラル部及びプラグ部における ECH 加熱実験

主要閉じ込め領域であるセントラル部では、クーロン・ドラッグによるイオン・エネルギー損失の低減、高電子温度の安定維持などが重要な研究課題である。また、電位生成領域であるプラグ部では、ミラー端部への強い電子流束を発生させることがわかっており、ECH パワー変調入射する事で、ダイバータ模擬研究に向けた間欠的な ELM 様高熱流負荷を生成することを重要な研究課題の一つと位置付けている。

本研究で用いるセントラル部に設置された ECH の入射配位を図 1 に示す。セントラル部 ECH では 28 GHz の電磁波を用いるため、基本波共鳴層は、磁場強度 1 T、第二高調波共鳴層は、磁場強度 0.5 T の位置となる。プラズマによる電磁波吸収率の計算結果から、異常波 (X-mode) の偏波でおよそ 100% 吸収され、正常波 (O-mode) の偏波で数%程度の吸収とい

う結果が得られていた。しかし、実験的には0-modeの電磁波入射によって、より高い電子温度まで加熱されることが確認された。そこで、プラズマから放射される軟X線のエネルギースペクトルを計測する軟X線波高分析器（PHA：Pulse Height Analyzer）をセントラル部 ECH 実験に適用した。高周波加熱によって生成・維持されたプラズマに対し、ECH を入射パワー100 kW、偏波を X-mode と 0-mode でそれぞれ入射した時の PHA の計測結果を図2に示す。0-mode 入射によって高温成分が生成される原因の一つとして、1 T 層を透過した電磁波が伝播経路にある金属平板の ICRF アンテナによって反射され、0.5 T 層で電磁波が吸収される可能性が考えられる。反射板の役割を果たす ICRF アンテナを取り外して 0-mode の入射実験を行った結果、アンテナ取り外し後で低温成分は変わらず、高温成分の温度のみが低下する結果が確認された。基本波共鳴層における高温成分の生成と、第二高調波によるパワー吸収の可能性があることが分かった。

プラグ部では、既存の 500 kW ジャイロトロンを用いた ECH システムにおいて、入射パワー変調実験を行い、熱流データ及び端損失電子データの取得を行った。図3に、ガンマ10プラグ部及びエンド部の概略図を示す。プラグ部 ECH のパワー変調によるプラズマ応答を、端損失電子、端損失イオンを計測できる静電エネルギー型分析器(LED, ELIEA)を用いて解析した。熱流は、可動型カロリメーターにより計測した。これまでに、ECH 放射パワー密度分布を中心軸上に局在化させたミラー・アンテナを適用した ECH パワー(P_{P-ECH})変調実験の結果、 $P_{P-ECH} = 450$ kW, 3 ms のプラグ部 ECH 入射で、 30 MW/m^2 を超える高熱流束が得られている。ECH は東西両プラグ部で入射しており、より効率的な電子加熱が実現している。一方で、ECH による閉じ込め電位が生成されるため、ECH 印加中は、端損失によるイオン流束は大きく減少する。そのため、生成されるプラズマ流束としては、高温の電子流束が流入した後、ECH オフにより、閉じ込められていたプラズマ流が継続して流入することとなる。そこで、ECH の入射を両側ではなく片側のみに行う事で、ECH 生成電位によるプラ

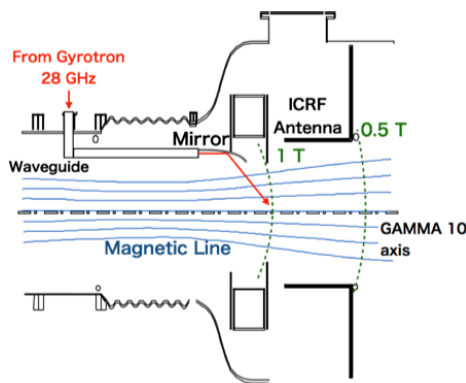


図1 セントラル部 ECH アンテナ配位。

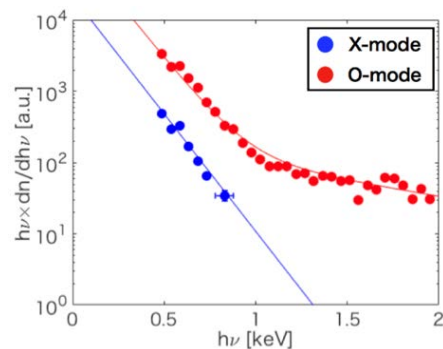


図2 軟X線エネルギースペクトルの入射偏波依存性。

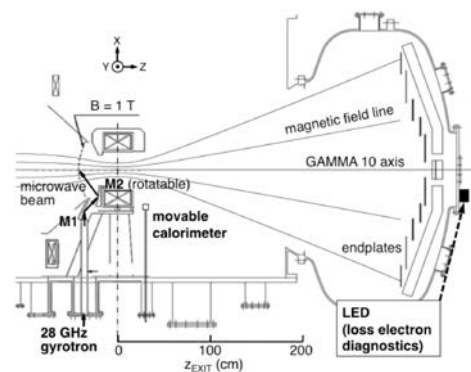


図3 西側プラグ部及びエンド部断面概略図。

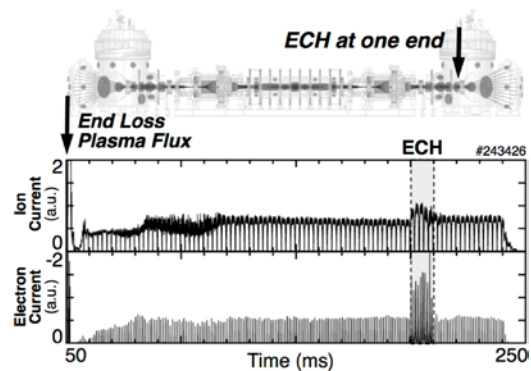


図4 ECH 生成電位による端損失プラズマ流束の制御。

ズマ流束の制御を行うことを試みた。図 4 に、西プラグ部のみに ECH 入射を行い、反対側の東端部での端損失プラズマの計測を行なった結果を示す。ECH の印加により、イオン電流及び電子電流が、同時に増加している。以上より、両プラグ部 ECH 入射時ほどの高熱流束ではないものの、電子流束のみだけでなくイオン流束も同時に増大させることが、ECH 生成電位制御により可能であることが分かった。この手法を用いることで、ECH 印加中に、更に ICRF 加熱の重量を行うことで、生成されるイオンの熱流束及び粒子束の増大が期待出来る。

【12】核融合に向けた大電力ジャイロトロンの開発

(1) はじめに

タンデムミラーGAMMA10/PDX では、プラグ部及びセントラル部電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)によるプラズマ閉じ込め性能の研究と改善に加え、基幹研究の新展開として開始されたダイバータ模擬研究の高度化に向け、ECRH システムの大電力化、長パルス化を進めている。ECRH/ECCD(電子サイクロトロン電流駆動)用大電力マイクロ波源である大電力ジャイロトロンの開発は、プラズマ研究センター(PRC)における研究開発の大きな柱の一つと成っており、共同研究として、核融合科学研究所(NIFS)の LHD 用、九州大学の QUEST 用、プリンストン大学の NSTX-U 用、京都大学の Heliotron J 用ジャイロトロンの開発も進めているところである。さらに、量子科学技術研究開発機構(QST)との共同研究として DEMO 用 300GHz ジャイロトロンの開発も開始した。

(2) 28/35GHz 2 周波数ジャイロトロンの開発

PRC では 28GHz-1MW ジャイロトロンを開発し、最大出力で 1.38MW、長パルス運転で 0.6MW-2s を達成した。本ジャイロトロンは、共同研究として、九州大学の QUEST 装置に適用され、2017 年度のプラズマ実験において世界最大となる 86kA の無誘導プラズマ電流立上を達成した。次のジャイロトロン開発として、GAMMA10/PDX のダイバータ模擬研究において、より高い熱流束を生成するために 28GHz-2MW-3s のジャイロトロンの開発を進めている。このジャイロトロンは、共同研究を有効に進めるため、QUEST で必要とされる動作性能 28GHz-0.4MW-CW(連続動作)、NSTX-U で必要とされる動作性能 28 GHz-1.5~2 MW-3s、Heliotron J で必要とされる動作性能 35 GHz-1 MW-0.5 秒を 1 本のジャイロトロンで動作可能な、2 周波ジャイロトロンである。

2017 年度は、QUEST で要求される 28GHz-0.4MW-CW(連続)動作の検証のため、サファイア製ダブル・ディスク窓の冷却性能評価試験を実施した。図 1 に試験状況の写真を示す。窓出力 0.45MW で 2 秒動作時、及び出力停止後の出力窓のサファイア・ディスク温度の時間変化を、整合器(MOU)に取付けたフッ化バリウム製ビューイングポートを通し赤外線カメラで測定した。測定は、2 枚のサファイア板間に流す冷却材であるフロリナートの流量を変えて行った。冷却時間帯の温度変化の測定値と計算値の比較を行うことにより求めた、サファイア板から冷却材への熱伝達率を図 2 に示す。出力 0.4MW に対

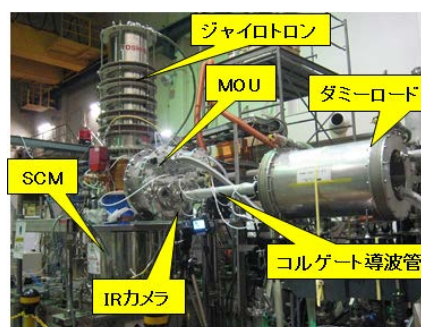


図 1 28/35GHz ジャイロトロン評価試

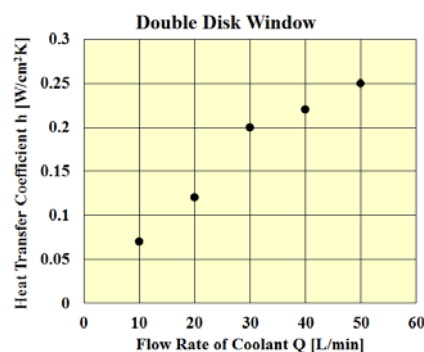


図 2 ダブルディスク窓の冷却流量に対する熱伝達率

し、熱伝達率 $h=0.15\text{W}/\text{cm}^2\text{K}$ とした時の窓温度変化の計算結果は、ほぼ 80°C で飽和しており（初期温度 20°C ）、冷却材の流量を $30\text{L}/\text{min}$ 以上取れば、 $28\text{GHz}-0.4\text{MW}-\text{CW}$ 動作が可能と考えられる。2017 年度は、 $0.46\text{MW}-2.8$ 秒までの動作を確認しており、2018 年度に CW ダミールの整備等を行い、準 CW 動作確認の予定である。また、電子ビームの分散改善のため、電子銃の改造を終え、2018 年度より、 28GHz で 1.5MW 以上、 35GHz で 1MW 以上の出力を目指す予定である。

（３）14GHz ジャイロトロンの設計

将来の QUEST や GAMMA 10/PDX 中央部加熱への適用を見込み 14GHz ジャイロトロンの設計検討を進めている。これまでに、14GHz と 28GHz の 2 周波数で動作が可能な 2 周波数ジャイロトロンの検討を行ったが、動作可能な発振モードの組合せが無いため、14GHz の単一発振ジャイロトロンの設計検討を進めてきた。

2017年度より、実際にジャイロトン製作を行うことを前提に、より詳細な設計検討を開始した。空洞共振器の発振モードは、発振特性、電子銃動作特性、放射器特性を考慮し $\text{TE}_{4,2}$ モードに決定した。空洞共振器で発振した円形導波管モードの電磁波は、放射器によりガウス状ビームに変換、4枚の内蔵ミラー系で伝送し、出力窓より放射する。放射されたガウス状RFビームは整合器(MOU)に内蔵されたミラーにより、分布・位相整形を行いコルゲート導波管に HE_{11} モードとして結合、プラズマまで伝送する事になる。既設28GHzジャイロトンの内蔵ミラー配位を基本に計算された放射器から出力窓までの伝送効率、69%と低い結果と成った。周波数の低い14GHzの電磁波ビームの発散が大きく、光路長の長い伝送ミラー3-4間、ミラー4と出力窓間での減衰が大きいのが原因である。そこで伝送損失の大きい部分の光路長を短くするよう構造を見直し、RF伝送効率改善に向けて検討を進めている。コルゲート導波管をジャイロトン管内に入れ、第4ミラーと導波管カップリング位置間距離を大幅に短くすることも検討していく。これが実現できればMOUが不用となり、システムの低コスト化にとっても大きなメリットがある。

（４）77/51GHz 2 周波数ジャイロトロンの設計

NIFS とのジャイロトン共同研究において、2014 年度までに開発した 3 機の 77GHz ジャイロトンと 2 機の 154GHz ジャイロトンは、LHD 実験に供されている。全入力電力は 5.4MW に達し、LHD における電子系内部輸送障壁(electron ITB)実験等に大きく貢献している。これらの実績を踏まえ 2015 年度より、154GHz と 116GHz の両方で動作可能な 2 周波数ジャイロトンの開発を開始した。

2017 年度は、LHD の重水素実験のプラズマスタートアップ用として、77/51GHz 2 周波数ジャイロトンの設計を開始した。空洞共振器の発振モードの組合せとして、($77\text{GHz}-\text{TE}_{18,6}$, $49.69\text{GHz}-\text{TE}_{12,4}$) と ($77\text{GHz}-\text{TE}_{18,7}$, $51.88\text{GHz}-\text{TE}_{12,5}$) で初期検討を行った。既設の 77GHz ジャイロトン ($\text{TE}_{18,6}$ モード) と同じ空洞共振器構造において、 $49.69\text{GHz}-\text{TE}_{12,4}$ は 1.3MW の発振が可能であった。既設の 77GHz ジャイロトンと同じ放射器/ミラー系において、 49.69GHz の RF ビームの窓までの伝送効率は 91% だった。厚み 2.46mm のダイヤモンド窓を搭載した場合、 46.69GHz の窓での電力反射率は 3.6% であった。77GHz を $\text{TE}_{18,7}$ モードで発振させる新規設計の場合、 $51.88\text{GHz}-\text{TE}_{12,5}$ モードの 1MW 以上の発振が可能である事を確認した。 51.88GHz の RF ビームの窓での電力反射率は 0.5% である。

（５）300GHz ジャイロトロンの開発

量子科学技術研究開発機構(QST)との共同研究として、2014 年度より核融合発電に向けた原型炉(Demo)用 300GHz 帯ジャイロトンの開発を進めている。これまでの動作試験において、 299.84GHz ($\text{TE}_{32,18}$) で 522kW 、 295.65GHz ($\text{TE}_{31,18}$) で 542kW 、 301.8GHz ($\text{TE}_{30,19}$) で 528kW を達成、周波数 $226\sim 254\text{GHz}$ での 300kW 程度の 7 つ

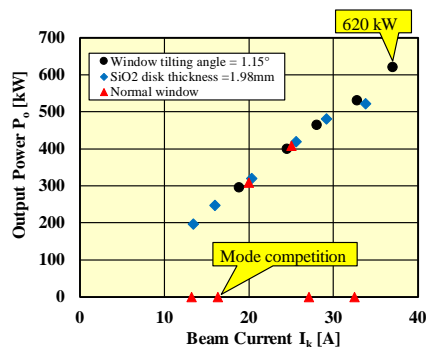


図 3 300GHz ジャイロトン発振試験

の発振の確認等、サブミリ波領域での周波数可変 MW ジャイロトロン開発の基礎となる成果を得ている。

2017 年度試験においては、出力窓構造を改造し、RF 伝送軸に対し出力窓を傾ける事により、窓反射の空洞共振器発振への影響を抑制し、0.62MW の出力を得た（図 3）。

<論文>

01. T. Kariya, T. Imai, R. Minami, K. Sakamoto, Y. Oda, R. Ikeda, T. Shimozuma, S. Kubo, H. Idei, T. Numakura, K. Tsumura, Y. Ebashi, M. Okada, Y. Nakashima, Y. Yoshimura, H. Takahashi, S. Ito, K. Hanada, K. Nagasaki, M. Ono, T. Eguchi, Y. Mitsunaka, Development of over-MW gyrotrons for fusion at 14 GHz to sub-THz frequencies, *Nuclear Fusion* **57** (2017) 066001-1-066001-9.
02. Y. Takeiri, T. Morisaki, M. Osakabe, M. Yokoyama, S. Sakakibara, H. Takahashi, Y. Nakamura, T. Oishi, G. Motojima, S. Murakami, K. Ito, A. Ejiri, S. Imagawa, S. Inagaki, M. Isobe, S. Kubo, S. Masamune, T. Mito, I. Murakami, K. Nagaoka, K. Nagasaki, K. Nishimura, M. Sakamoto, R. Sakamoto, T. Shimozuma, K. Shinohara, H. Sugama, K.Y. Watanabe, J.W. Ahn, N. Akata, T. Akiyama, N. Ashikawa, J. Baldzuhn1, T. Bando, E. Bernard, F. Castejón, H. Chikaraishi, M. Emoto, T. Evans, N. Ezumi, K. Fujii, H. Funaba, M. Goto, T. Goto, D. Gradic, Y. Gunsu, S. Hamaguchi, H. Hasegawa, Y. Hayashi, C. Hidalgo, T. Higashiguchi, Y. Hirooka, Y. Hishinuma, R. Horiuchi, K. Ichiguchi, K. Ida, T. Ido, H. Igami, K. Ikeda, S. Ishiguro, R. Ishizaki, A. Ishizawa, A. Ito, Y. Ito, A. Iwamoto, S. Kamio, K. Kamiya, O. Kaneko, R. Kanno, H. Kasahara, D. Kato, T. Kato, K. Kawahata, G. Kawamura, M. Kasaki, S. Kitajima, W.H. Ko, M. Kobayashi, S. Kobayashi, T. Kobayashi, K. Koga, A. Kohyama, R. Kumazawa, J.H. Lee, D. López-Bruna, R. Makino, S. Masuzaki, Y. Matsumoto, H. Matsuura, O. Mitarai, H. Miura, J. Miyazawa, N. Mizuguchi, C. Moon, S. Morita, T. Moritaka, K. Mukai, T. Muroga, S. Muto, T. Mutoh, T. Nagasaka, Y. Nagayama, N. Nakajima, Y. Nakamura, H. Nakanishi, H. Nakano, M. Nakata, Y. Narushima, D. Nishijima, A. Nishimura, S. Nishimura, T. Nishitani, M. Nishiura, Y. Nobuta, H. Noto, M. Nunami, T. Obana, K. Ogawa, S. Ohdachi, M. Ohno, N. Ohno, H. Ohtani, M. Okamoto, Y. Oya, T. Ozaki, B.J. Peterson, M. Preynas, S. Sagara, K. Saito, H. Sakaue, A. Sanpei, S. Satake, M. Sato, T. Saze, O. Schmitz, R. Seki, T. Seki, I. Sharov, A. Shimizu, M. Shiratani, M. Shoji, C. Skinner, R. Soga, T. Stange, C. Suzuki, Y. Suzuki, S. Takada, K. Takahata, A. Takayama, S. Takayama, Y. Takemura, Y. Takeuchi, H. Tamura, N. Tamura, H. Tanaka, K. Tanaka, M. Tanaka, T. Tanaka, Y. Tanaka, S. Toda, Y. Todo, K. Toi, M. Toida, M. Tokitani, T. Tokuzawa, H. Tsuchiya, T. Tsujimura, K. Tsumori, S. Usami, J.L. Velasco, H. Wang, T.-H. Watanabe, T. Watanabe, J. Yagi, M. Yajima, H. Yamada, I. Yamada, O. Yamagishi, N. Yamaguchi, Y. Yamamoto, N. Yanagi, R. Yasuhara, E. Yatsuka, N. Yoshida, M. Yoshinuma, S. Yoshimura and Y. Yoshimura, Extension of the operational regime of the LHD towards a deuterium experiment, *Nuclear Fusion* **57** (2017) 102023-1-102023-10.
03. H. Idei, T. Kariya, T. Imai, K. Mishra, T. Onchi, O. Watanabe, H. Zushi, K. Hanada, J. Qian, A. Ejiri, M.M. Alam, K. Nakamura, A. Fujisawa, Y. Nagashima, M. Hasegawa, K. Matsuoka, A. Fukuyama, S. Kubo, T. Shimozuma, M. Yoshikawa, M. Sakamoto, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima, S. Ide, T. Maekawa, Y. Takase and K. Toi, Fully non-inductive second harmonic electron cyclotron plasma ramp-up in the QUEST spherical tokamak, *Nuclear Fusion* **57** (2017) 126045-1-126045-11.
04. Y. Nakashima, K. Ichimura, M.S. Islam, M. Sakamoto, N. Ezumi, M. Hirata, M. Ichimura, R. Ikezoe, T. Imai, T. Kariya, I. Katanuma, J. Kohagura, R. Minami, T. Numakura, M. Yoshikawa, T. Iijima, M. M. Islam, K. Nojiri, K. Shimizu, A. Terakado, S. Togo, N. Asakura, M. Fukumoto, A. Hatayama, Y. Hirooka, S. Kado, H. Kubo, S. Masuzaki, H. Matsuura, T. Nakano, S. Nagata, N. Nishino, N. Ohno, A. Sagara, S. Sawada, M. Shoji, A. Tonegawa and Y. Ueda, Recent progress of divertor simulation research using the GAMMA 10/PDX tandem mirror, *Nuclear Fusion* **57** (2017) 116033-1-116033-10.
05. M. S. Islam, Y. Nakashima and Hatayama, Investigation of Plasmas Behavior During Noble Gas Injection in the End-cell of GAMMA 10/PDX by Using the multi-fluid code LINDA,

- Plasma Physics and Controlled Fusion **59**, 12 (2017) 125010(1-11).
06. T. Takimoto, F. Ishikawa, T. Iijima, Y. Tanaka, A. Tonegawa, K. N. Sato, K. Kawamura, Experimental simulation of the Super-X divertor for detached plasma using TPD-Sheet IV, *Fusion Engineering and Design* **124** (2017) 235-238.
 07. M.S. Islam, Y. Nakashima, A. Hatayama, K. Ichimura, M. M. Islam, K. Fukui, M. Ohuchi, T. Yokodo, G. Lee, S. Togo, N. Ezumi, M. Sakamoto and T. Imai, Numerical Simulation of Detached Plasma in the End-Cell of GAMMA 10/PDX for Divertor Simulation Study, *Fusion Engineering and Design* **124** (2017) 216-221.
 08. K. Ichimura, Y. Kitahara, Y. Nonda, S. Nakamoto. H. Takeno, H. Matsuura, Y. Nakashima, Development of calorimeter system for conceptual study of CuspDEC divertor, *Fusion Engineering and Design* (2018) doi:10.1016/j.fusengdes.2018.02.046.
 09. Md. Maidul Islam, Yousuke Nakashima, Shinji Kobayashi, Nobuhiro Nishino, Kazuya Ichimura, Takaaki Iijima, Md. Shahinul Islam, Takayuki Yokodo, Guanyi Lee, Tsubasa Yoshimoto, Sotaro Yamashita, Masayuki Yoshikawa, Junko Kohagura, Mafumi Hirata, Ryutaro Minami, Tsuyoshi Kariya, Ryuya Ikezoe, Makoto Ichimura, Mizuki Sakamoto, Tsuyoshi Imai, Study of Plasma Behavior during ECRH Injection in the GAMMA 10 SMBI Experiments, *Journal of Physics: Conference Series* **959** (2017) 012007(1-4).
 10. M. S. Islam, Y. Nakashima, A. Hatayama, R. Tatsumi, M. M. Islam and T. Iijima, Numerical Simulation Study towards Plasma Detachment in the End-Cell of GAMMA 10/PDX by a Coupled Fluid-Neutral Code, *Contributions to Plasma Physics* (2018) 201700122, doi:10.1002/ctpp.201700122.
 11. M. Sakamoto, A. Terakado, K. Nojiri, N. Ezumi, Y. Nakashima, K. Sawada, K. Ichimura, M. Fukumoto, K. Oki, K. Shimizu, N. Ohno, S. Masuzaki, S. Togo, J. Kohagura, M. Yoshikawa, Structural Change of Plasma at Various Ambient Pressures in 28 GHz Millimeter-Wave Discharges, *Frontier of Applied Plasma Technology* **10**, 1 (2017) 7-10.
 12. M. Sakamoto, A. Terakado, K. Nojiri, N. Ezumi, Y. Nakashima, K. Sawada, K. Ichimura, M. Fukumoto, K. Oki, K. Shimizu, N. Ohno, S. Masuzaki, S. Togo, J. Kohagura, M. Yoshikawa, Molecular activated recombination in divertor simulation plasma on GAMMA 10/PDX, *Nuclear Materials and Energy* **12** (2017) 1004-1009.
 13. G. Motojima, N. Yoshida, S. Masuzaki, R. Sakamoto, M. Tokitani, H. Tanaka, T. Murase, D. Nagata, K. Matsumoto, M. Miyamoto, M. Yajima, M. Sakamoto, H. Yamada, T. Morisaki, the LHD Experiment Group, Wide-range evaluation of the deposition layer thickness distribution on the first wall by reflection coefficient measurements, *Nuclear Materials and Energy* **12** (2017) 1219-1223.
 14. M. Osakabe, Y. Takeiri, T. Morisaki, G. Motojima, K. Ogawa, M. Isobe, M. Tanaka, S. Murakami, A. Shimizu, K. Nagaoka, H. Takahashi, K. Nagasaki, H. Takahashi, T. Fujita, Y. Oya, M. Sakamoto, Y. Ueda, T. Akiyama, H. Kasahara, S. Sakakibara, R. Sakamoto, M. Tokitani, H. Yamada, M. Yokoyama, Y. Yoshimura & LHD Experiment Group, Current Status of Large Helical Device and Its Prospect for Deuterium Experiment, *Fusion Science and Technology* **72**, 3 (2017) 199-210.
 15. X. Wang, Z. Ma, M. Yoshikawa, J. Kohagura, T. Tokuzawa, D. Kuwahara, and A. Mase, Mixed p type structure in Wilkinson power divider design with 3rd harmonic suppression, *Microwave and Optical Technology Letters* **59**, 6 (2017) 1245-1248.
 16. R. Ikezoe, M. Ichimura, J. Itagaki, M. Hirata, S. Sumida, S. Jang, K. Izumi, A. Tanaka, R. Sekine, Y. Kubota, Y. Shima, J. Kohagura, M. Yoshikawa, M. Sakamoto, and Y. Nakashima, Measurement of ICRF wave propagation using a microwave reflectometer with fast antenna switching on GAMMA 10, *Journal of Instrumentation* **12** (2017) C12017(1-8).
 17. S. Sumida, K. Shinohara, R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Sakamoto, M. Hirata, and S. Ide, Comparison of Dispersion Model of Magneto-Acoustic Cyclotron Instability with Experimental Observation of ^3He Ion Cyclotron Emission on JT-60U, *Journal of Physical Society of Japan* **86**, 12 (2017) 124501.

＜学位論文＞

学位論文（博士）〔数理物質科学研究科〕

01. Md. Maidul Islam [博士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
Study of Fueling by Supersonic Molecular Beam Injection in the GAMMA 10 Tandem Mirror
02. Md. Shahinul Islam [博士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
Study of Plasma Behavior Based on Particle and Heat Flux Measurements and Numerical Simulation in the GAMMA 10/PDX End-Cell

学位論文（修士）〔数理物質科学研究科〕

03. 伊能俊太郎 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
金属蒸着により表面改質されたタングステンの重水素吸蔵特性及び GAMMA 10 の壁表面改質
04. 横土敬幸 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA 10/PDX におけるエンド部への希ガス類入射時の分光計測に基づく不純物挙動に関する研究
05. 梶野悟史 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
X 線計測を用いた GAMMA 10/PDX セントラル部 ECRH 偏波制御による加熱効果の研究
06. 板垣惇平 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA 10 高周波位相制御実験時のマイクロ波反射計を用いた波動計測
07. 李冠億 [修士（理学），数理物質科学研究科物理学専攻]
GAMMA 10 セントラル部におけるヘリウムを用いた中性粒子ビーム入射の効果に関する研究

学位論文（学士）〔理工学群〕

08. 関根諒 [学士（理学），理工学群物理学類]
GAMMA 10 セントラル部における 2 チャンネルマイクロ波反射計を用いた低周波揺動解析
09. 久保田裕士 [学士（理学），理工学群物理学類]
GAMMA 10/PDX バリア部における波動励起効率の波動計算コードを用いた評価
10. 今野直斗 [学士（理学），理工学群物理学類]
GAMMA 10 での ECH 偏波制御実験における金中性粒子ビームプローブを用いた電位計測
11. 松崎亨平 [学士（理学），理工学群物理学類]
小型プラズマ生成装置 APSEDAS においてヘリウムプラズマ照射されたタングステンの表面観察
12. 須藤駿 [学士（理学），理工学群物理学類]
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬プラズマへの水素ガスとアルゴン供給による非接触プラズマ生成時の線電子密度計測
13. 北條俊孝 [学士（理学），理工学群物理学類]
GAMMA 10/PDX セントラル部 ECRH 配位による電子加熱特性の解析
14. 本吉郁哉 [学士（理学），理工学群物理学類]
28/35 GHz 2 周波数ジャイロトンの定常動作に向けたサファイア製ダブルディスク窓の特性評価
15. 毛利友弥 [学士（理学），理工学群物理学類]
再生レーザ増幅方式による長時間マルチパストムソン散乱計測システムの開発
16. 安藤泰斗 [学士（工学），理工学群物理学類]
高密度プラズマ源試験装置におけるガス圧力分布の解析的評価
17. 原利樹 [学士（工学），理工学群物理学類]
GAMMA 10/PDX におけるダイバータ模擬プラズマ上流部の静電プローブ計測

<講演>

01. H. Idei, T. Kariya, T. Onchi, K. Hanada, T. Imai, A. Ejiri, T.I. Tsujimura, S. Kubo, O. Watanabe, H. Ohwada, K. Yamazaki, K. Nakamura, A. Fujisawa, Y. Nagashima, M. Hasegawa, A. Higashijima, T. Nagata, S. Kawasaki, H. Zushi, Y. Takase, A. Fukuyama, Fully Non-inductive Plasma Current Start-up by Focused Millimeter-Wave Beam in QUEST, The 22nd Topical Conference on Radiofrequency Power in Plasmas (Aix en Provence, France, 2017.5.30-2017.6.2).
02. M. Sakamoto, H. Tanaka, S. Ino, H. Watanabe, M. Tokitani, Deuterium retention in tungsten irradiated by heavy ions, 3rd Research Coordination Meeting of the CRP on “Plasma-Wall Interaction with Irradiated Tungsten and Tungsten Alloys in Fusion Devices” (Vienna, Austria, 2017.6.27-2017.6.30).
03. M. Fukunari, T. Yamaguchi, Y. Nakamura, T. Harada, K. Komurasaki, Y. Oda, R. Ikeda, K. Kajiwara, K. Takahashi, K. Sakamoto, R. Minami, T. Kariya, T. Imai, Experiments on the Millimeter-wave Discharge in Atmosphere at 170 GHz and 28 GHz in the Subcritical Condition, The 10th International Workshop “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications” (Nizhny Novgorod, Russia, 2017.7.17-2017.7.22).
04. K. Sakamoto, R. Ikeda, T. Kariya, Y. Oda, T. Kobayashi, K. Kajiwara, K. Hayashi, R. Minami, K. Takahashi, T. Imai, S. Moriyama, Study of High Power and High Frequency Gyrotron for Fusion Reactor, 42 International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2017) (Cancun, Mexico, 2017.8.27-2017.9.1).
05. T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, T. Tsujimura, R. Makino, S. Ito, Y. Mizuno, H. Takubo, S. Kobayashi, R. Minami, T. Kariya, T. Imai, Current Status of the LHD ECRH System and Development of Dual-Frequency Gyrotrons, 2017 US-EU-JPN RF Heating Technology Workshop and the US-JPN RF Physics Workshop (Santa Monica, California, USA, 2017.9.5-2017.9.8).
06. H. Idei, T. Kariya, T. Onchi, K. Hanada, T. Imai, A. Ejiri, T.I. Tsujimura, S. Kubo, O. Watanabe, H. Ohwada, K. Yamazaki, K. Nakamura, A. Fujisawa, Y. Nagashima, M. Hasegawa, A. Higashijima, T. Nagata, S. Kawasaki, H. Zushi, Y. Takase, A. Fukuyama, Fully Non-inductive Plasma Current Start-up by Focused Millimeter-Wave Beam in QUEST, 2017 US-EU-JPN RF Heating Technology Workshop and the US-JPN RF Physics Workshop (Santa Monica, California, USA, 2017.9.5-2017.9.8).
07. T. Numakura, T. Kariya, R. Minami, Y. Ebashi, S. Kajino, M. Okada, T. Imai, Code Development for the Calculation of Time-dependent Multimode Oscillations in the Cavity of the Future High-Power Gyrotrons, 2017 US-EU-JPN RF Heating Technology Workshop and the US-JPN RF Physics Workshop (Santa Monica, California, USA, 2017.9.5-2017.9.8).
08. Md. M. Islam, Y. Nakashima, S. Kobayashi, N. Nishino, K. Ichimura, T. Iijima, Md. S. Islam, T. Yokodo, G. Lee, T. Yoshimoto, S. Yamashita, M. Yoshikawa, J. Kohagura, M. Hirata, R. Minami, T. Kariya, R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Sakamoto and T. Imai, Study of Plasma Behavior during ECRH Injection in the GAMMA 10 SMBI Experiments, International Conference on Research and Applications of Plasmas (Warsaw, Poland, 2017.9.18-2017.9.22) P2.3.
09. M. Sakamoto, N. Ezumi, Y. Nakashima, A. Terakado, K. Nojiri, K. Sawada, K. Ichimura, M. Yoshikawa, J. Kohagura, M. Fukumoto, N. Ohno, S. Masuzaki, M. Ichimura, T. Imai, Divertor Simulation and Hydrogen Recycling Study Utilizing End Region of the Tandem Mirror GAMMA 10/PDX, 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (Chengdu, China, 2017.9.18-2017.9.23). [Invited]
10. R. Ikezoe, M. Ichimura, J. Itagaki, M. Hirata, S. Sumida, S. Jang, K. Izumi, A. Tanaka, R. Sekine, Y. Kubota, Y. Shima, J. Kohagura, M. Yoshikawa, M. Sakamoto, Y. Nakashima, Measurement of ICRF wave propagation using a microwave reflectometer with fast antenna switching on GAMMA 10, 18th Laser Aided Plasma Diagnostics Conference (LAPD18) (Prague, Czech Republic, 2017.9.24-2017.9.28).
11. J. Itagaki, R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Hirata, S. Sumida, S. Jang, K. Izumi, A. Tanaka,

- R. Sekine, Y. Kubota, Y. Shima, J. Kohagura, M. Yoshikawa, M. Sakamoto, Y. Nakashima, Correction of time varying offset in a heterodyne reflectometer for fluctuation measurement on GAMMA 10, 18th Laser Aided Plasma Diagnostics Conference (LAPD18) (Prague, Czech Republic, 2017.9.24-2017.9.28).
12. K. Ichimura, Y. Kitahara, Y. Nonda, S. Nakamoto, H. Takeno, H. Matsuura, Y. Nakashima, Development of calorimeter system for a conceptual study of CuspDEC divertor, 13th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (Kyoto, 2017.9.25-2017.9.29) P1-121.
 13. M.S. Islam, Y. Nakashima, R. Tatsumi, A. Hatayama, M.M. Islam and T. Iijima, Numerical Simulation Study towards Plasma Detachment in the End-cell of GAMMA 10/PDX by a Coupled Fluid-Neutral Code, 16th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices (Marseille, France, 2017.9.27-2017.9.29) P1-02.
 14. S. Togo, T. Takizuka, K. Hoshino, K. Ibano, Y. Li, Y. Ogawa, M. Sakamoto, N. Ezumi, Y. Nakashima, SOL-divertor plasma simulation based on a generalized fluid model incorporating ion temperature anisotropy and mirror effect, 16th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices (Marseille, France, 2017.9.27-2017.9.29) O-05.
 15. T. Onchi, H. Idei, M. Hasegawa, T. Nagata, K. Kuroda, K. Hanada, T. Kariya, S. Kubo, T.I. Tsujimura, S. Kobayashi, Electron cyclotron heating/current-drive system using high power tubes for QUEST spherical tokamak, 59th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (Milwaukee, USA, 2017.10.23-2017.10.27).
 16. R. Ikezoe, M. Ichimura, S. Jang, M. Hirata, S. Sumida, J. Itagaki, K. Izumi, A. Tanaka, Y. Kubota, R. Sekine, M. Sakamoto, Y. Nakashima, Studies on ion heating of the GAMMA 10/PDX plasma in a higher density regime toward a future divertor simulating linear device, 59th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (Milwaukee, USA, 2017.10.23-2017.10.27).
 17. R. Ikezoe, M. Ichimura, S. Jang, M. Hirata, S. Sumida, J. Itagaki, K. Izumi, A. Tanaka, Y. Kubota, R. Sekine, M. Sakamoto, Y. Nakashima, ICRF heating based approach for production of a linear plasma with high ion temperature, 6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 18. S. Jang, M. Ichimura, M. Hirata, R. Ikezoe, M. Sakamoto, S. Sumida, J. Itagaki, K. Izumi, A. Tanaka, Y. Kubota, R. Sekine, Y. Nakashima, Additional ICRF heating experiments to control end-loss ions on GAMMA 10/PDX, 6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 19. Y. Nakashima and the GAMMA 10/PDX Team, Current status and future plan of divertor simulation experiments in the University of Tsukuba, 6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 20. T. Iijima, M. S. Islam, K. Nojiri, A. Terakado, T. Yokodo, T. Yoshimoto, S. Yamashita, N. Ezumi, M. Sakamoto and Y. Nakashima, Characteristics of detached plasma produced by simultaneously injection of H₂ and radiator gas in GAMMA 10/PDX, 6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 21. M.S. Islam, Y. Nakashima, A. Hatayama, K. Ichimura, T. Iijima, M.M. Islam, T. Yokodo, G. Lee, T. Yoshimoto, Y. Yamashita, S. Togo, N. Ezumi and M. Sakamoto, Numerical Simulation Study of Plasma Behavior in the End-cell of GAMMA 10/PDX by Using a Multi-Fluid Code,

- 6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
22. R. Minami, T. Kariya, T. Numakura, Y. Ebashi, S. Kajino, M. Okada, Y. Endo, T. Imai, Y. Nakashima,
Experimental Study on Generation of High Intermittent Heat Flux by ECH Modulation in GAMMA 10 Tandem Mirror,
6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 23. M. Sakamoto, N. Nakashima, N. Ezumi, R. Ikezoe, I. Katanuma, T. Kariya, M. Yoshikawa, R. Minami, M. Hirata, J. Kohagura, T. Numakura, S. Togo, T. Iijima, T. Imai, M. Ichimura
R&D of high temperature and high density divertor plasma simulator with mirror confinement, PMIF2017,
6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 24. N. Ezumi, K. Nojiri, A. Terakado, Y. Kinoshita, K. Kobayashi, T. Iijima, M.S. Islam, T. Yokodo, S. Togo, J. Kohagura, M. Yoshikawa, M. Sakamoto and Y. Nakashima,
Energy Loss Process during Detached Plasma Operation in Divertor Simulation Experimental Module of GAMMA 10/PDX,
6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 25. S. Togo, D. Reiser, P. Börner, Y. Nakashima, M. Sakamoto, N. Ezumi,
Mirror Effect on Plasma Profiles in Open-Field Systems,
6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 26. A. Terakado, M. Sakamoto, N. Ezumi, K. Nojiri, T. Yokodo, T. Iijima, S. Togo, S. Kado, K. Sawada, Y. Nakashima,
Measurement of rovibrational temperatures of hydrogen molecule in divertor simulation plasma on GAMMA 10/PDX,
6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 27. K. Nojiri, M. Sakamoto, N. Ezumi, A. Terakado, S. Togo, T. Iijima, T. Yokodo, M. Yoshikawa, J. Kohagura and Y. Nakashima,
Effect of Neutral Particle Exhaust on Plasma Detachment in Divertor Simulation Experiment on GAMMA 10/PDX,
6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 28. S. Ino, M. Sakamoto, H. Watanabe, M. Tokitani, N. Ashikawa, Y. Oya, A. Terakado, N. Ezumi, Y. Nakashima,
Deuterium retention in tungsten irradiated by 2.4 MeV Cu²⁺,
6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 29. M. Yoshikawa, J. Kohagura, Y. Shima, H. J. van der Maiden, M. Sakamoto, N. Ezumi, Y. Nakashima,
Detached plasma fluctuation study in the linear plasma device,
6th International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research (PMIF2017) (Tsukuba, Japan, 2017.11.1-2017.11.3).
 30. Y. Nakashima, M. Sakamoto, I. Katanuma, T. Kariya, M. Yoshikawa, N. Ezumi R. Minami, M. Hirata, J. Kohagura, T. Numakura, R. Ikezoe, S. Togo, T. Iijima, M.S. Islam, M.M. Islam, T. Yokodo, K. Nojiri, A. Terakado, S. Jang, S. Yamashita, T. Yoshimoto, T. Imai, M. Ichimura.,
Current Status of Divertor Simulation Research in the GAMMA 10/PDX Tandem Mirror, Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8). [*Invited*]
 31. M. Yoshikawa, A. Sugiyama, Y. Washo, I. Katanuma, Y. Shima, Y. Nakashima, H. Nakanishi, M. Ohsuna, M. Kojima, Y. Nagayama,
Development of Thomson scattering system in GAMMA 10/PDX,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion

- Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
32. J. Kohagura, T. Tokuzawa, M. Yoshikawa, Y. Shima, K. Nojiri, A. Terakado, N. Ezumi, M. Sakamoto, Y. Nakashima,
Measurement of azimuthal velocity profile of density fluctuations in the central cell of GAMMA 10 using Doppler reflectometry,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
 33. K. Nojiri, M. Sakamoto, N. Ezumi, T. Takizuka, S. Togo, A. Terakado, Y. Kinoshita, Y. Nakashima,
Evaluation of ion temperature of the end-loss plasma using a Langmuir probe in GAMMA 10/PDX tandem mirror,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
 34. S. Togo, D. Reiser, P. Börner, M. Sakamoto, N. Ezumi, Y. Nakashima,
Benchmarking of B2 Code with a One-Dimensional Plasma Fluid Code Incorporating Anisotropic Ion Temperature on Simple Mirror Configurations,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
 35. M.S. Islam, Y. Nakashima, A. Hatayama¹, K. Ichimura², T. Iijima, M.M. Islam, T. Yokodo, G. Lee, T. Yoshimoto, Y. Yamashita, N. Ezumi and M. Sakamoto,
Investigation of E-Divertor Plasma during Simultaneous Injection of Hydrogen and Impurity Gas in GAMMA 10/PDX by Using the LINDA Code,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
 36. D. Kuwahara, N. Ito, H. Tsuchiya, Y. Nagayama, T. Yoshinaga, T. Yoshinaga, M. Yoshikawa, J. Kohagura, S. Yamaguchi, Y. Kogi, A. Mase, X. Wang,
Development of Local Oscillator Integrated Antenna Array for E-band Microwave Imaging Interferometer,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
 37. T. Yokodo, Y. Nakashima, T. Iijima, T. Yoshimoto, K. Ichimura, M.M. Islam, M.S. Islam, G. Lee, S. Yamashita, A. Terakado, K. Nojiri, M. Yoshikawa, J. Kohagura, N. Ezumi, M. Sakamoto and T. Imai,
Impact of the Upstream Plasma Parameters on Spectroscopic Measurement in the GAMMA 10/PDX Divertor Simulation Experiments,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
 38. A. Terakado, M. Sakamoto, N. Ezumi, K. Nojiri, T. Mikami, S. Togo, T. Iijima, T. Yokodo, K. Sawada, S. Kado, Y. Nakashima,
Measurements of hydrogen molecular rovibrational temperature with high temperature target in divertor simulation plasma on GAMMA 10/PDX,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
 39. T. Iijima, M. S. Islam, K. Nojiri, A. Terakado, T. Yokodo, T. Yoshimoto, S. Yamashita, N. Ezumi, M. Sakamoto and Y. Nakashima,
Study on produce of detached plasma by H₂ and Ar injection in GAMMA 10/PDX,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
 40. K. Ichimura, S. Yamashita, Y. Nakashima, M. Fukumoto, M. Shoji, M. Sakamoto, N. Ezumi, Md. M. Islam, Md. S. Islam, T. Yokodo, G. Lee, A. Terakado, K. Nojiri, T. Yoshimoto, T. Hara, H. Takeno,
Sensitivity Calibrations of ASDEX Type Fast Ionization Gauges in Mixed Gas Environment of Hydrogen and Noble Gases,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
 41. Y. Honda, H. Yamada, Y. Kitahara, K. Ichimura, S. Nakamoto, H. Takeno, H. Matsuura, Y. Nakashima,

- Measurement of Heat Quantity in a Small Cusp-type Direct Energy Converter for Divertor Thermal Load Reduction,
Joint meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (Toki, Japan, 2017.12.5-2017.12.8).
42. M. Suzuki, M. Matsukura, K. Shimamura, S. Yokota, T. Kariya, R. Minami, S. Minakawa, S. Suganuma, S. Mizojiri,
High Power and Long Distance Microwave WPT using 300kW Gyrotron at 28GHz,
Asia International Workshop on Wireless Power Transfer Workshop (AWPT2017) (National University of Singapore, Singapore, 2017.12.9-2017.12.11).
 43. R. Ikezoe, M. Ichimura, M. Hirata, S. Sumida, S. Jang, J. Itagaki, K. Izumi, A. Tanaka, Y. Kubota, R. Sekine, J. Kohagura, Y. Shima, M. Yoshikawa, R. Minami, M. Sakamoto, and Y. Nakashima,
Recent studies toward ICRF heating of a high density linear plasma on GAMMA 10/PDX,
Japan-Korea Workshop on “Physics and Technology of Heating and Current Drive in Fusion Plasmas” (Uji, Japan, 2018.2.27-2018.2.28).
 44. Y. Harada, Y. Nakamura, K. Komurasaki, R. Minami, T. Kariya, T. Imai,
Structural Change of Plasma at Reduced Pressures in 28 GHz Millimeter-Wave Discharge,
24th Annual Meeting of Institute of Applied Plasma Science (IAPS 2017) & 10th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials (Hanoi University of Science Technology, Vietnam, 2017.3.10-2017.3.14).
 45. 中嶋洋輔,
筑波大学プラズマ研究センターにおける双方向型共同研究の成果概要と研究計画,
平成 29 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム [核融合エネルギーフォーラム ITER・BA 技術推進委員会 ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価ワーキンググループフォローアップ会合第 3 回会合 (オープン合同)] , (つくばイノベーションプラザ, 2017. 8. 3-2017. 8. 4).
 46. 假家強, 今井剛, 南龍太郎, 沼倉友晴, 津村康平, 江橋優斗, 梶野悟史, 下妻隆, 久保伸, 吉村泰夫, 高橋裕巳, 伊神弘恵, 出射浩, 花田和明, 長崎百伸, 斉藤輝雄, 立松芳典, 山口裕資,
電子サイクロトロン高密度プラズマ加熱連携研究における 2 周波数 (28/35GHz, 14/21GHz) ジャイロトロンの開発と ECH 実験への適用,
平成 29 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム [核融合エネルギーフォーラム ITER・BA 技術推進委員会 ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価ワーキンググループフォローアップ会合第 3 回会合 (オープン合同)] , (つくばイノベーションプラザ, 2017. 8. 3-2017. 8. 4).
 47. 坂本瑞樹,
定常高密度プラズマ装置計画,
平成 29 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム [核融合エネルギーフォーラム ITER・BA 技術推進委員会 ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価ワーキンググループフォローアップ会合第 3 回会合 (オープン合同)] , (つくばイノベーションプラザ, 2017. 8. 3-2017. 8. 4).
 48. 吉川正志,
GAMMA 10/PDX におけるトムソン散乱計測システムの進展,
平成 29 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム [核融合エネルギーフォーラム ITER・BA 技術推進委員会 ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価ワーキンググループフォローアップ会合第 3 回会合 (オープン合同)] , (つくばイノベーションプラザ, 2017. 8. 3-2017. 8. 4).
 49. 江角直道, プラズマ研究センター将来計画検討 WG,
高密度ダイバータプラズマ模擬に向けたパイロット装置の開発,
平成 29 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム [核融合エネルギーフォーラム ITER・BA 技術推進委員会 ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価ワーキンググループフォローアップ会合第 3 回会合 (オープン合同)] , (つくばイノベーションプラザ, 2017. 8. 3-2017. 8. 4).

50. 東郷訓, 坂本瑞樹, 江角直道, Dirk Reiser, Petra Börner, 中嶋洋輔,
磁場構造の非一様性に着目したダイバータプラズマシミュレーション,
平成 29 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム [核融合エネルギーフォー
ラム ITER・BA 技術推進委員会 ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価ワーキング
グループフォローアップ会合第 3 回会合 (オープン合同)], (つくばイノベーション
プラザ, 2017. 8. 3-2017. 8. 4).
51. 池添竜也, 他,
GAMMA 10/PDX における端損失イオン束の制御と高密度直線プラズマのイオン加熱に向
けた取り組み,
平成 29 年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム [核融合エネルギーフォー
ラム ITER・BA 技術推進委員会 ダイバータ研究開発加速戦略方策検討評価ワーキング
グループフォローアップ会合第 3 回会合 (オープン合同)], (つくばイノベーション
プラザ, 2017. 8. 3-2017. 8. 4).
52. 江角直道, プラズマ研究センター将来計画検討 WG,
筑波大プラズマ研究センターにおける新装置計画の概要,
NIFS 共同研究 平成 29 年度第 1 回「境界プラズマ挙動の理解と異分野間融合による新
展開」研究会, (核融合科学研究所, 2017. 8. 9- 2017. 8. 10).
53. 東郷 訓, 坂本瑞樹, 江角直道, 中嶋洋輔, 滝塚知典, 伊庭野健造, 小川雄一,
磁場の非一様性が開放端磁場プラズマのパラメータに与える影響の解析,
NIFS 共同研究 平成 29 年度第 1 回「境界プラズマ挙動の理解と異分野間融合による新
展開」研究会, (核融合科学研究所, 2017. 8. 9- 2017. 8. 10).
54. 寺門明紘,
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬プラズマにおける Fulcher- α 帯発光スペクトルを用い
た水素分子振動温度評価,
NIFS 共同研究 平成 29 年度第 1 回「境界プラズマ挙動の理解と異分野間融合による新
展開」研究会, (核融合科学研究所, 2017. 8. 9- 2017. 8. 10).
55. 野尻訓平,
GAMMA 10/PDX における分子活性化再結合による非接触プラズマ形成に対する中性粒子
排気の影響,
NIFS 共同研究 平成 29 年度第 1 回「境界プラズマ挙動の理解と異分野間融合による新
展開」研究会, (核融合科学研究所, 2017. 8. 9- 2017. 8. 10).
56. 飯島貴朗,
GAMMA 10/PDX における H₂-Ar 入射による非接触プラズマ生成とその基礎特性,
NIFS 共同研究 平成 29 年度第 1 回「境界プラズマ挙動の理解と異分野間融合による新
展開」研究会, (核融合科学研究所, 2017. 8. 9- 2017. 8. 10).
57. 木下洋輔, 江角直道, 野尻訓平, 寺門明紘, 三上智弘, 小林楓, 坂本瑞樹, 東郷訓,
中嶋洋輔,
イオンセンシティブプローブによる GAMMA10/PDX ダイバータ模擬プラズマのイオン温
度計測,
第 56 回プラズマ若手夏の学校, (赤穂ハイツ, 2017. 8. 29- 2017. 9. 1).
58. 三上智弘, 坂本瑞樹, 江角直道, 寺門明紘, 野尻訓平, 木下洋輔, 東郷訓,
南龍太郎, 仲野友英, 中嶋洋輔,
タンデムミラー装置 GAMMA 10/PDX における HeI 強度比法を用いた電子温度・電子密
度計測,
第 56 回プラズマ若手夏の学校, (赤穂ハイツ, 2017. 8. 29- 2017. 9. 1).
59. 小林楓, 木下洋輔, 野尻君平, 寺門明紘, 東郷訓, 江角直道, 坂本瑞樹,
Md. Shahinul ISLAM, 横土敬幸, 小波蔵純子, 吉川正志, 中嶋洋輔, 澤田圭司,
桑原大介, 篠原俊二郎, 増崎貴,
レーザー誘起蛍光法を用いた GAMMA10/PDX ダイバータ模擬プラズマのイオン・中性粒
子速度分布計測システムの構築,
第 56 回プラズマ若手夏の学校, (赤穂ハイツ, 2017. 8. 29- 2017. 9. 1).

60. 坂本瑞樹,
プラズマ科学と先端技術 ―核融合プラズマと材料開発―,
第 15 回 高校生シンポジウム, (東海大学 湘南キャンパス, 2017. 8. 29).
61. 東郷 訓, 滝塚知典, 星野一生, 伊庭野健造, 李躍, 小川雄一, 細川哲成,
D. Reiser, P. Börner, 坂本瑞樹, 江角直道, 中嶋洋輔,
ミラー効果によるエネルギー遷移を考慮した一次元プラズマ輸送シミュレーション,
理論共同研究「過渡現象を含んだ壁面一周辺・炉心プラズマ相互作用モデリング」研究
作業会, (核融合科学研究所, 2017. 9. 12- 2017. 9. 13).
62. 江角直道, GAMMA10/PDX 実験グループ、将来計画 WG,
GAMMA 10 実験および新装置計画概要,
原型炉特別チーム共同研究 「原型炉における熱・粒子制御に関する物理課題の検討
とモデル化」第一回会合, (慶応大学, 2017. 9. 14-2017. 9. 15).
63. M. S. Islam,
Present Status of Numerical Simulation Study towards the plasma detachment
in the End-Cell of GAMMA 10/PDX,
原型炉特別チーム共同研究 「原型炉における熱・粒子制御に関する物理課題の検討
とモデル化」第一回会合, (慶応大学, 2017. 9. 14-2017. 9. 15).
64. 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDX を用いたダイバータ研究の現状と次期装置による将来計画,
「ダイバータの学理と応用」研究会, (核融合科学研究所, 2017. 9. 20).
65. M. S. Islam,
Present Status of Numerical Simulation Study in the E-Divertor Region GAMMA
10/PDX,
「ダイバータの学理と応用」研究会, (核融合科学研究所, 2017. 9. 20).
66. 飯島貴朗,
GAMMA 10/PDX における不純物・水素入射による非接触プラズマ生成実験,
「ダイバータの学理と応用」研究会, (核融合科学研究所, 2017. 9. 20).
67. 中嶋洋輔, 坂本瑞樹, 江角直道, 飯島貴朗, Md. Shamsul Islam, 横土敬幸, 野尻訓平,
寺門明紘, 山下双太郎, 吉本翼, 朝倉伸幸, 市村和也, 大野哲靖, 門信一郎,
坂本隆一, 澤田圭司, 畑山明聖, 福本正勝, 松浦寛人, 片沼伊佐夫, 假家強,
小波蔵純子, 沼倉友晴, 平田真史, 南龍太郎, 吉川正志, 池添竜也, 東郷訓,
今井 剛, 市村真,
筑波大学における大型タンデムミラー装置を用いたダイバータ模擬研究の最近の進展
と将来計画,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017. 11. 20-2017. 11. 24) 21Cp-02.
68. 東郷 訓, 坂本瑞樹, 江角直道, 滝塚知典, 小川雄一, 伊庭野健造, 野尻訓平,
李冠億, 中嶋洋輔,
非一様磁場に伴うミラー効果と超音速流に着目したダイバータプラズマシミュレーシ
ョン,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017. 11. 20-2017. 11. 24) 22Ca-04.
69. 出射浩, 恩地拓己, 假家強, 長谷川真, 中村一男, 江尻晶, 松本直希, 川又裕也,
Mishra Kishore, 福山雅治, 柚木美羽, 小島信一郎, 黒田賢剛, 渡辺理, 花田和明,
辻村亨, 久保伸,
Fully non-inductive electron cyclotron plasma ramp-up with focusing mirror
launcher system in the QUEST spherical tokamak,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017. 11. 20-2017. 11. 24) 22Ca-04.
70. 江角直道, 増崎貴, 利根川昭, 大野哲靖, 澤田圭司, 門信一郎, 難波慎一,
西島大輔, 飯島貴朗, 高木誠, 安藤泰斗, 東郷訓, 木下洋輔, 小林楓, 野尻訓平,
寺門明紘, 三上智弘, 坂本瑞樹, 吉川正志, 小波蔵純子, 池添竜也, 中嶋洋輔,
原型炉級ダイバータ模擬実験に向けた TPD 型定常高密度プラズマ源の開発,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017. 11. 20-2017. 11. 24) 22Ep-03.

71. 隅田脩平, 篠原孝司, 池添竜也, 市村 真, 坂本瑞樹, 平田真史, 井手俊介,
JT-60U における D-D 反応生成物に起因するイオンサイクロトロン放射の励起機構,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-46.
72. 板垣惇平, 池添竜也, 市村 真, 平田真史, 隅田脩平, ジャンソウオン, 泉 昂希,
田中温人, 関根 諒, 久保田裕士, 嶋 頼子, 小波蔵純子, 吉川正志, 坂本瑞樹,
中嶋洋輔,
GAMMA 10 における位相制御 ICRF 加熱時のプラズマ内部波動の評価,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-47.
73. 池添竜也, 市村真, ジャンソウオン, 平田真史, 隅田脩平, 板垣惇平, 泉昂希,
田中温人, 久保田裕士, 関根諒, 坂本瑞樹, GAMMA 10/PDX group,
GAMMA 10/PDX を用いた高密度直線プラズマ振動のイオン加熱に向けた取り組み,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-49.
74. 田中温人, 平田真史, 市村真, 池添竜也, 隅田脩平, ジャンソウオン, 板垣惇平,
泉昂希, 久保田裕士, 関根諒, 坂本瑞樹, 中嶋洋輔,
GAMMA 10 アンカー部 ICRF 加熱によるセントラル部浮遊電位の上昇,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-50.
75. 泉昂希, 池添竜也, 市村真, 平田真史, 坂本瑞樹, 隅田脩, ジャンソウオン,
板垣惇平, 田中温人, 久保田裕士, 関根諒, 中嶋洋輔,
GAMMA 10 における自発励起 ICRF 波動に起因する端損失高エネルギーイオンの測定,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-51.
76. ジャンソウオン, 市村真, 平田真史, 池添竜也, 坂本瑞樹, 隅田脩平, 板垣惇平,
泉昂希, 田中温人, 久保田裕士, 関根諒, 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDX における ICRF 高周波を用いた端損失イオンの制御,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-52.
77. S. Kajino, T. Imai, T. Kariya, R. Minami, T. Numakura, Y. Ebashi, M. Okada,
M. Sakamoto, M. Yoshikawa, Y. Nakashima,
Experimental Results of Wave Polarization Change in GAMMA 10/PDX Central
Cell ECRH,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-53.
78. Md. S. Islam, Y. Nakashima, A. Hatayama, K. Ichimura, T. Iijima, MD M. Islam,
T. Yokodo, K. Lee, T. Yoshimoto, S. Yamashita, T. Hara, N. Ezumi, M. Sakamoto
Present Status of Numerical Simulation Study in the End-cell of GAMMA 10/PDX
by Using the LINDA Code,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-81.
79. 三上智弘, 坂本瑞樹, 江角直道, 寺門明紘, 野尻訓平, 木下洋輔, 東郷訓,
飯島貴朗, 横土敬幸, 南龍太郎, 梶野悟史, 仲野友英, 中嶋洋輔,
Measurement of electron temperature and density with ratios of HeI line
intensities of divertor simulation plasma in ECH on GAMMA 10/PDX,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-88.
80. 横土敬幸, 中嶋洋輔, 飯島貴朗, 吉本翼, M. M. Islam, M. S. Islam, 李冠億,
山下双太郎, 原利樹, 寺門明紘, 野尻訓平, 吉川正志, 小波蔵純子, 江角直道,
坂本瑞樹,
GAMMA 10/PDX における分光計測に基づいたプラズマ追加熱が不純物輸送へ及ぼす影響
評価,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-90.
81. 飯島貴朗, M. S. Islam, M. M. Islam, 寺門明紘, 野尻訓平, 横土敬幸, 李冠億,
吉本翼, 山下双太郎, 原利樹, 小波蔵純子, 江角直道, 坂本瑞樹, 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDX における不純物・水素同時入射での非接触プラズマ生成過程,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-94.
82. 木下洋輔, 江角直道, 野尻訓平, 寺門明紘, 東郷訓, 三上智弘, 小林楓, 坂本瑞樹,
中嶋洋輔, 飯島貴朗, 小波蔵純子, 吉川正志, 利根川昭, 田中宏彦, 増崎貴,

- イオンセンシティブプローブを用いた GAMMA10/PDX 端損失領域における非接触プラズマのイオン温度計測,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-96.
83. 小林楓、木下洋輔、野尻訓平、寺門明紘、東郷訓、江角直道、坂本瑞樹、
ISLAM Shahinul、横土敬幸、小波蔵純子、吉川正志、中嶋洋輔、澤田圭司、
桑原大介、篠原俊二郎、増崎貴、
レーザー誘起蛍光法を用いた GAMMA10/PDX ダイバータ模擬プラズマのイオン・中性粒子速度分布計測システムの構築,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-97.
84. 吉本翼、中嶋洋輔、飯島貴朗、横土敬幸、イスラムマイドゥル、
イスラム シャヒヌル、李冠億、山下双太郎、原利樹、寺門明紘、野尻訓平、
吉川正志、小波蔵純子、江角直道、坂本瑞樹、
GAMMA 10/PDX におけるコアプラズマ加熱による不純物挙動の分光計測,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-100.
85. 寺門明紘、坂本瑞樹、江角直道、野尻訓平、三上智弘、東郷訓、飯島貴朗、
横土敬幸、澤田圭司、門 信 一郎、中嶋 洋輔、
GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬プラズマにおける過渡的熱流束による非接触-接触遷移時のプラズマ計測,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-102.
86. 野尻訓平、坂本瑞樹、江角直道、寺門明紘、飯島貴朗、東郷訓、横土敬幸、
三上智弘、吉本翼、木下洋輔、小林楓、小波蔵純子、吉川正志、中嶋洋輔、
GAMMA 10/PDX における分子活性化再結合に起因する非接触プラズマ形成への中性粒子排気の影響,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-104.
87. 鈴木雅敏、松倉真帆、嶋村耕平、横田茂、南龍太郎、假家強、
28GHz ジャイロトロンによる移動体ワイヤレス給電への応用,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 22P-129.
88. 吉川正志、小波蔵純子、嶋頼子、千勝雅之、坂本瑞樹、南龍太郎、江角直道、
中嶋洋輔、安原亮、山田一博、舟場久芳、南貴司、釧持尚輝、
タンデムミラーGAMMA 10/PDX におけるトムソン散乱計測システムの進展,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 23Da-02.
89. 桑原大介、五十嵐明彦、篠原俊二郎、伊藤直樹、土屋隼人、徳沢季彦、長山好夫、
吉永智一、吉川正志、小波蔵純子、山口聡一朗、近木祐一郎、間瀬淳、
マイクロ波イメージング計測用局部発振器内蔵型アンテナアレイの開発,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 23Da-03.
90. Md. M. Islam, Y. Nakashima, S. Kobayashi, N. Nishino, K. Ichimura, T. Iijima,
Md. S. Islam, T. Yokodo, G. Lee, T. Yoshimoto, S. Yamashita, T. Hara,
M. Yoshikawa, J. Kohagura, M. Hirata, R. Minami, T. Kariya, R. Ikezoe,
M. Ichimura, M. Sakamoto, T. Imai,
Recent Results of SMBI Experiment in GAMMA 10,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 23P-11.
91. M. Okada, T. Kariya, T. Imai, R. Minami, T. Numakura, Y. Endo, F. Motoyoshi,
Y. Nakashima,
The Performance Test of 28/35 GHz Dual Frequency-Gyrotron Output Window for
CW Operation,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 23P-39.
92. T. Kariya, R. Minami, T. Imai, T. Numakura, Y. Ebashi, T. Shimosuma, S. Kubo,
K. Sakamoto, H. Idei, K. Hanada, T. Eguchi, Y. Mitsunaka, Y. Nakashima,
Status of Collaborative Research of Gyrotron Developments at University of
Tsukuba,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 23P-40.

93. 李冠億, 中嶋洋輔, M. M. Islam, 飯島貴朗, M. S. Islam, 横土敬幸, 山下双太郎, 吉本翼, 原利樹, 大川和夫,
低密度水素プラズマにおけるヘリウム NBI の効果に関する研究,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 23P-42.
94. T. Numakura, T. Kariya, R. Minami, Y. Ebashi, S. Kajino, M. Okada, T. Hojo, F. Motoyoshi, T. Imai, Y. Nakashima,
Code Development for the Mode Competition in the Cavity of Future High-Power Gyrotrons,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 23P-45.
95. K. Ichimura, S. Yamashita, M. Fukumoto, Y. Nakashima, M. Shoji, M. Sakamoto, N. Ezumi, T. Iijima, Md. M. Islam, Md. S. Islam, T. Yokodo, G. Lee, K. Nojiri, A. Terakado, H. Takeno,
水素・希ガス混合条件における ASDEX ゲージを用いたガス圧計測,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 23P-71.
96. 伊能俊太郎、坂本瑞樹、鈴木佑、渡辺英雄、芦川直子、時谷政行、寺門明紘、江角直道、中嶋洋輔,
タングステン蒸着層の水素同位体吸蔵特性,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 23P-96.
97. 松浦寛人、大内理人、山本優矢、イスラム シャヒヌール、中嶋洋輔,
ガンマ 10/PDX のプラズマ熱流束測定のための評価モデルの比較,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 24P-02.
98. 鈴木佑、坂本瑞樹、伊能俊太郎、坂本隆一、宮本光貴、江角直道、中嶋洋輔,
GAMMA 10 極小磁場部における反射計を用いた高周波揺動計測壁表面の実時間その場測定に向けた分光エリプソメトリーシステムの開発,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 24P-60.
99. H. Takeno, F. Kondo, T. Wakaizumi, K. Ichimura, S. Nakamoto, Y. Nakashima,
進行波型直接エネルギー変換模擬実験装置における集群イオンの電解による散乱に関する研究,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 24P-91.
100. 小波蔵純子、徳沢季彦、吉川正志、嶋頼子、野尻訓平、寺門明紘、王小龍、江角直道、坂本瑞樹、中嶋洋輔,
ドップラー反射計を用いた GAMMA10 の密度揺動回転計測,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 24P-128.
101. 山下双太郎、市村和也、中嶋洋輔、福本正勝、飯島貴朗、M. M. Islam、M. S. Islam、横土敬幸、李冠億、吉本翼、原利樹,
D-module における各種放射冷却ガスを用いた ASDEX ゲージの較正実験,
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) 24P-130.
102. 坂本瑞樹,
周辺プラズマと壁との相互作用 [シンポジウム「固体、気体、プラズマを通じた核融合燃料水素循環の理解と制御」],
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24) S7-4.
103. 中嶋洋輔,
筑波大学プラズマ研究センターにおけるダイバータ模擬研究の展開と新計画 (はじめに) [インフォーマルミーティング],
Plasma Conference 2017, (姫路商工会議所, 2017.11.20-2017.11.24).
104. 東郷訓、滝塚知典、坂本瑞樹、江角直道、小川雄一、伊庭野健造、野尻訓平、李躍、中嶋洋輔,
Study of mirror effect on SOL-divertor plasma based on a generalized fluid model incorporating ion temperature anisotropy,
15th Burning Plasma Simulation Initiative (BPSI) Meeting, (九州大学応用力学研究所, 2017.11.29-2017.11.30) 2-2.

105. ジャンソウォン, 市村真, 平田真史, 池添竜也, 坂本瑞樹, 隅田脩平, 板垣惇平, 泉昂希, 田中温人, 久保田裕士, 関根諒, 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDX における ICRF 追加熱に起因した端損失イオンの評価,
第 7 回 ICRF 加熱研究会「ICRF 加熱装置の高性能化と将来応用」, (核融合科学研究所, 2017. 12. 19).
106. 隅田脩平, 篠原孝司, 池添竜也, 市村真, 坂本瑞樹, 平田真史, 井手俊介,
JT-60U におけるイオンサイクロトロン放射を励起する DD 核融合生成物の速度分布,
第 7 回 ICRF 加熱研究会「ICRF 加熱装置の高性能化と将来応用」, (核融合科学研究所, 2017. 12. 19).
107. 横土敬幸, 中嶋洋輔, M. S. Islam, 吉本翼,
GAMMA 10/PDX における不純物挙動の端損失粒子束変化による発光量への影響評価,
平成 29 年度「原子分子過程研究と受動・能動分光計測の高度化のシナジー効果によるプラズマ科学の展開」「原子分子データ応用フォーラムセミナー」合同研究会,
(核融合科学研究所, 2017. 12. 20-2017. 12. 22).
108. 三上智弘, 坂本瑞樹, 江角直道, 寺門明紘, 横土敬幸, 仲野友英, GAMMA 10 Group,
GAMMA10/PDX における He I 線強度比法を用いたダイバータ模擬プラズマ計測,
平成 29 年度「原子分子過程研究と受動・能動分光計測の高度化のシナジー効果によるプラズマ科学の展開」「原子分子データ応用フォーラムセミナー」合同研究会,
(核融合科学研究所, 2017. 12. 20-2017. 12. 22).
109. 吉川正志,
再生レーザー増幅方式による高時間分解電子温度計測システムの開発,
平成 29 年度 LHD 計画共同研究成果報告会 (プラズマ分野), (核融合科学研究所, 2018. 1. 16).
110. 原田祐貴, 田畑邦佳, 中村友祐, 小紫公也, 假家強, 南龍太郎,
亜臨界領域における 28GHz ミリ波放電の進展,
宇宙輸送シンポジウム, (宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, 2018. 1. 18-2018. 1. 19) STEP-2017-057.
111. 吉川正志,
KSTAR プラズマにおける分光診断,
平成 29 年度日韓核融合協力事業報告会, (核融合科学研究所, 2018. 2. 9).
112. ジャンソウォン, 市村真, 平田真史, 池添竜也, 坂本瑞樹, 隅田脩平, 板垣惇平, 泉昂希, 田中温人, 久保田裕士, 関根諒, 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDX におけるイオンエネルギー分析器を用いたイオンの軸方向輸送の研究,
プラズマ流の基礎と応用に関する研究会, (東北大学工学研究科, 2018. 2. 23-2018. 2. 24).
113. 東郷 訓, 滝塚知典, Dirk Reiser, 小川雄一, 李躍, 伊庭野健造, 野尻訓平,
江角直道, 坂本瑞樹, 中嶋洋輔,
先進ダイバータの磁気ノズル効果による超音速プラズマ流のシミュレーション研究,
第 21 回 若手科学者によるプラズマ研究会, (量子科学技術研究開発機構 那珂核融合研究所, 2018. 3. 14-2018. 3. 16).
114. 寺門明紘, 坂本瑞樹, 江角直道, 野尻訓平, 三上智弘, 東郷訓, 飯島貴朗,
横土敬幸, 澤田圭司, 門信一郎, 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDX における高温タングステンターゲットを用いた水素リサイクリングに関する研究,
第 21 回 若手科学者によるプラズマ研究会, (量子科学技術研究開発機構 那珂核融合研究所, 2018. 3. 14-2018. 3. 16).
115. 野尻訓平, 坂本瑞樹, 江角直道, 寺門明紘, 飯島貴朗, 東郷訓, 横土敬幸,
木下洋輔, 三上智弘, 吉本翼, 山下双太郎, 小波蔵純子, 吉川正志, 中嶋洋輔,
GAMMA 10/PDX における非接触プラズマ形成へのガス供給および粒子排気の影響,
第 21 回 若手科学者によるプラズマ研究会, (量子科学技術研究開発機構 那珂核融合研究所, 2018. 3. 14-2018. 3. 16).

116. 出射浩, 恩地拓己, 假家強, 長谷川真, 中村一男, 江尻晶, 松本直希, M. Kishore, 福山雅治, 柚木美羽, 小島信一郎, 黒田賢剛, 渡辺理, 花田和明, 永島芳彦, 東島亜紀, 永田貴大, 辻村亨, 久保伸, Taylor Gary, Bertell Nicola, 小野雅之, 高瀬雄一, 福山淳, 村上定義,
QUEST における 28 GHz 電子サイクロトロン加熱システムを用いた非誘導プラズマ電
流立ち上げ実験,
日本物理学会第 73 回年次大会, (東京理科大学, 2018. 3. 22-2018. 3. 25).

〈解説・紀要等〉

01. 小田靖久, 今井剛,
小特集: ギガワット出力ミリ波ビーム源開発のための技術課題,
プラズマ・核融合学会誌 **93**, 10 (2017) 473-477.

〈受賞〉

01. ジャン ソウオン,
GAMMA 10/PDX における ICRF 高周波を用いた端損失イオンの制御,
プラズマ・核融合学会賞 若手学会発表賞, 2017. 11. 24.
02. Md. Shahinul Islam,
Study of Plasma Behavior Based on Particle and Heat Flux Measurements and
Numerical Simulation in the GAMMA 10/PDX End-Cell,
研究科長賞 (博士), 2018. 3. 23.
03. 横土敬幸,
GAMMA 10/PDX におけるエンド部への希ガス類入射時の分光計測に基づく不純物挙動に
関する研究,
研究科長賞 (修士), 2018. 3. 23.
04. 久保田裕士,
GAMMA 10/PDX バリア部における波動励起効率の波動計算コードを用いた評価,
理工学群長賞, 2018. 3. 23.